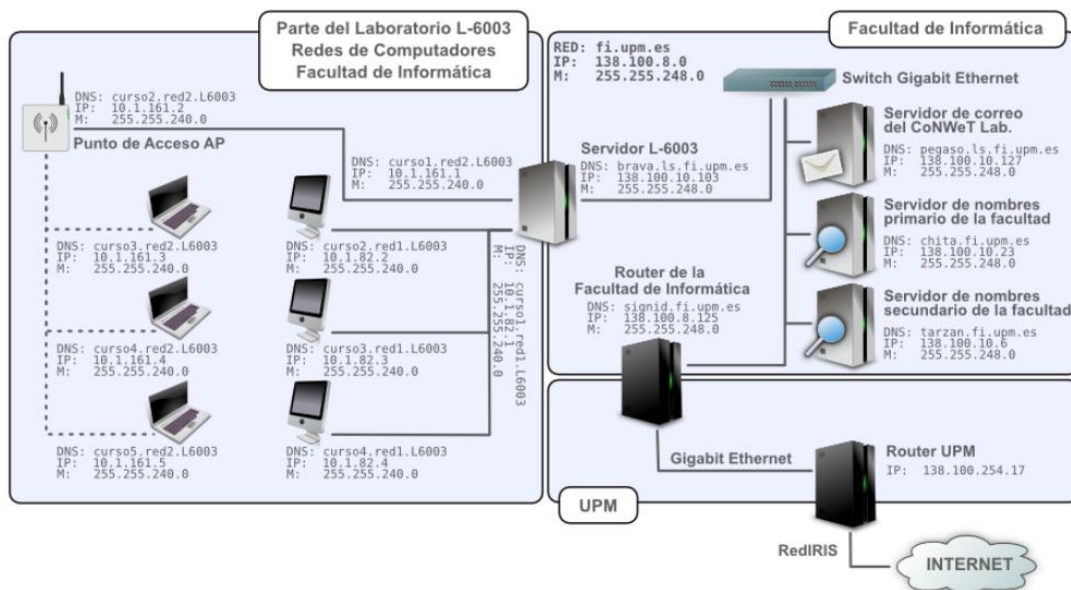


1.2 Conceptos básicos de transmisión de datos

Las redes son actualmente una de las partes esenciales de los sistemas de información, ya que, a través de ellas, un usuario puede comunicarse con otros y compartir recursos de información y computación, con el consiguiente ahorro económico que esto conlleva. Por tanto, las redes constituyen un poderoso medio de comunicación y de compartición de recursos (desde un servidor de almacenamiento a una costosa impresora láser a color de última generación).

A continuación, se muestra un diagrama de la red de la facultad de informática.



La red descrita en la imagen anterior permite que seis ordenadores de un laboratorio de la facultad se puedan comunicar entre ellos, con la Facultad y con todo Internet, a través de diferentes tecnologías (Ethernet y WiFi). En esta red se encuentran ordenadores personales, servidores, puntos de acceso, *switches* y *routers*, que se denominan de forma genérica **sistemas**.

Un **sistema** es un elemento **direccionable** dentro de una red, es decir, un elemento con una dirección individual y única en dicha red, que le identifica y que permite diferenciarlo del resto de sistemas.

Los sistemas de la red se comunican y comparten información. En la comunicación entre sistemas se pueden distinguir dos tipos de sistemas: los **sistemas finales**, que son aquellos situados en los extremos de una comunicación; y los **sistemas intermedios**, que son aquellos que hacen de intermediarios entre dos sistemas finales y se encargan de dirigir o encaminar las unidades de datos en función de la dirección del sistema destinatario de dichos datos.

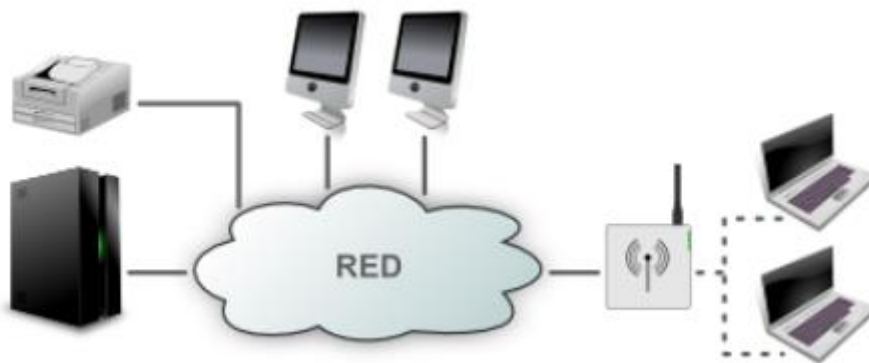
De la misma forma que dos personas que quieren comunicarse han de utilizar un mismo idioma, para que dos sistemas puedan compartir información han de hacer uso de un conjunto de reglas que rijan dicha comunicación. Este conjunto de reglas se recogen en una serie de protocolos de comunicaciones.

Protocolo de comunicaciones es el conjunto de reglas que rigen el diálogo entre entidades que realizan las mismas funciones.

En la comunicación entre varios sistemas se suelen emplear varios protocolos. Los sistemas cuentan con unos elementos especializados llamados **entidad**, que son los encargados de manejar los diferentes protocolos. Una entidad utiliza un protocolo concreto para comunicarse con la entidad equivalente del sistema remoto. Además, las entidades de un mismo sistema también colaboran entre sí apoyándose en las interfaces de comunicación de las otras entidades.

Una **interfaz de comunicación** es el medio de conexión funcional entre dos entidades independientes dentro de un mismo sistema, mediante la cual se pueden enviar y recibir los diferentes tipos de datos. Más formalmente, se puede definir **interfaz** como el conjunto de reglas que rigen el dialogo entre entidades contiguas, dentro de un mismo sistema, con funciones diferentes.

Una vez se ha definido qué son los sistemas y cómo se comunican entre sí, se va a pasar a describir cómo es la red que los une. La red de computadores mostrada en la figura anterior es, por ahora, difícil de entender. Sin embargo, el objetivo de la asignatura es que al final de la misma el alumno comprenda todo aquello que afecta a dicha red. Por ahora es suficiente con considerar que una red es algo muy conceptual, que se va a representar gráficamente mediante una "nube", y que sirve como medio común de comunicación y compartición de recursos de todo tipo.



Una **red** es un conjunto de sistemas, tanto finales como intermedios, que permite el intercambio de información entre los mismos.

Una red de ordenadores va a estar formada por sistemas (ordenadores en este caso) dotados de un adaptador de red (elemento hardware generalmente instalado en la placa base del equipo), el cual permite conectar dicho sistema a un medio físico compartido entre todos los sistemas de la red. La red de ordenadores más simple que se puede concebir es la formada por dos ordenadores unidos a través de un cable especial llamado *cable cruzado*, que es el medio físico compartido en este caso.

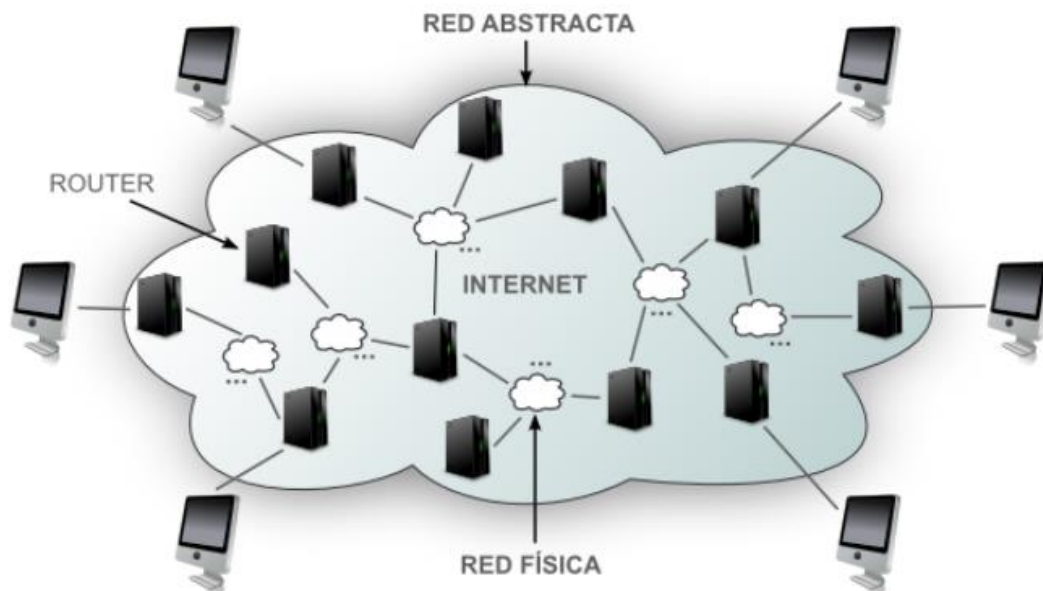


Sin embargo, por lo general las redes son más complejas, y están compuestas por múltiples sistemas (ordenadores, impresoras, etc.), ya sea compartiendo un mismo medio físico o a través de sistemas intermedios (como *switches* o puntos de acceso) que actúan como elementos de interconexión entre los sistemas finales.



Las redes pueden considerarse desde dos puntos de vista diferentes: físico y abstracto. Cada punto de vista da lugar a diferentes concepciones de red:

- **Redes de Datos (o redes físicas):** Estas redes engloban a aquellas que proporcionen cualquier tipo de servicio de comunicaciones (voz, datos, vídeo, etc.). Por ejemplo, una red de cable Ethernet o una red inalámbrica WiFi.
- **Redes de Ordenadores/Computadoras (o redes abstractas):** Están formadas por la interconexión de redes de datos.

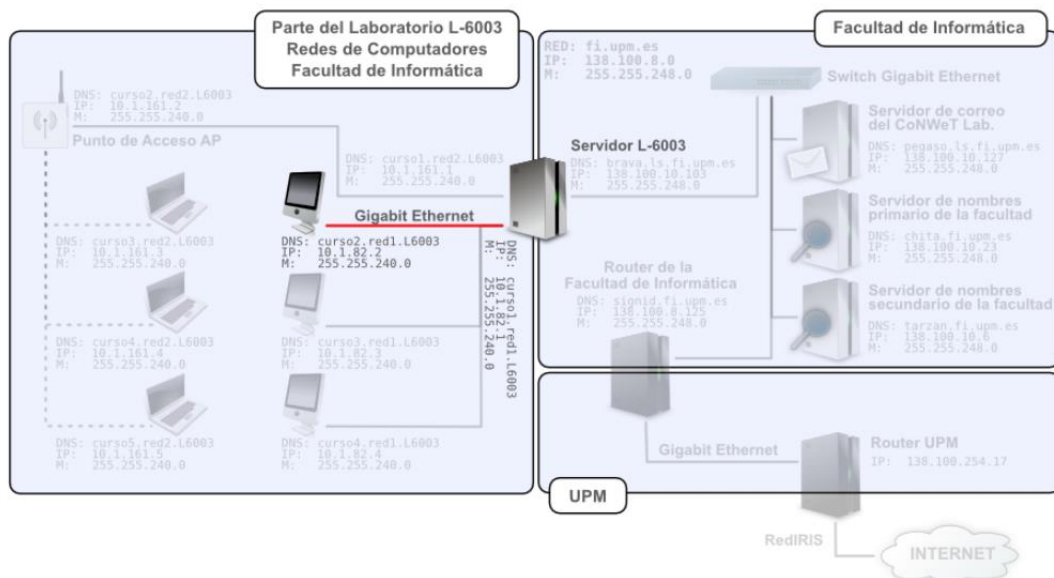


La interconexión de dos o más redes se realiza a través de un sistema intermedio al que se denomina *router* o dispositivo de encaminamiento. La interconexión de redes requiere que los sistemas que participan dispongan de un sistema de direccionamiento que permita tanto identificarlos como encaminar los datos. Asimismo, se necesita que los sistemas compartan el conjunto de protocolos de comunicaciones, lo que permite la interoperabilidad entre diferentes sistemas finales.

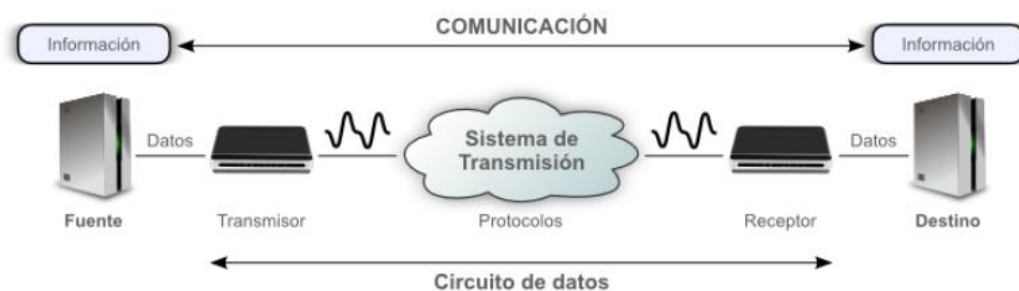
El ejemplo más significativo de interconexión de redes es la red Internet, una inmensa red de computadoras formada por la interconexión de infinidad de redes de datos y, en donde se utiliza un formato común de direccionamiento y unos mismos protocolos de comunicaciones, denominados de forma genérica TCP/IP.

Una vez definido el concepto de red de ordenadores, a continuación se va a explicar **cómo se envían los datos físicamente** entre dichos ordenadores, o lo que lo mismo, cuáles son los **aspectos de la transmisión física de la información**.

Si se observa el tramo representado en la siguiente figura, que une dos sistemas cualesquiera de la red de computadores del ejemplo inicial, se puede ver como un ordenador del laboratorio se conecta con el servidor presente en la misma sala, uniéndose a él a través de una red Ethernet.



En la comunicación entre estos dos sistemas del laboratorio, y en general en la de dos sistemas cualesquiera, participan los elementos mostrados en la siguiente figura.



Los **Equipos Terminales de Datos** (ETD) son los sistemas finales que participan en la comunicación. Por lo tanto, son aquellos que hacen de **fuentes** o **destinos** de la información.

La **fuentes** es todo sistema o recurso del que va a surgir determinada información, y más concretamente, los datos de una comunicación. Dichos datos se encaminan a un **destino**, que es el receptor final de la información.

Los **Equipos Terminales de Circuito de Datos** (ETCD) son aquellos sistemas encargados de transformar los datos de la fuente en señales adecuadas para poder transmitirlos a través del sistema de transmisión hasta el destino.

Los ETCDs pueden actuar como transmisores o receptores. Un **transmisor** es todo equipo que se encarga de enviar datos según un sistema de transmisión y empleando un protocolo acordado entre este equipo y el equipo **receptor**, que se encarga de recibir los datos e interpretarlos a través del protocolo de envío y el sistema de transmisión acordado.

Tanto en la figura como en las definiciones anteriores aparece el concepto de **comunicación**, que se define como el proceso mediante el cual se transmite información entre dos sistemas. Una comunicación no consiste únicamente en la transmisión de los datos. Los datos han de llegar íntegros al destino, solucionándose posibles problemas que puedan surgir en la transmisión como interferencias, ruido, pérdidas de información o errores. Además, y como es lógico, ambos extremos de la comunicación han de entender dichos datos de la misma forma.

Los **datos** a transmitir pueden ser analógicos o digitales. Los **datos analógicos** toman valores en un determinado intervalo continuo, como la temperatura medida por un sensor; sin embargo, los **datos digitales** toman valores discretos, como los valores 0 ó 1, o los enteros de 0 a 255.

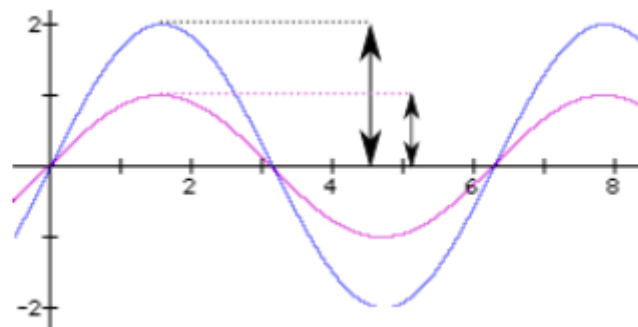
Para transmitir dichos datos se utilizan **señales electromagnéticas**, que son enviadas a través del medio o sistema de transmisión. Estas señales pueden ser **continuas** o **discretas**. Haciendo uso del lenguaje matemático, se puede decir que toda señal es una función matemática que toma un valor en cada punto del espacio en el que está definida. Una señal continua es una función continua de una o varias dimensiones, mientras que las señales discretas se caracterizan por estar definidas solamente para un conjunto discreto de valores de la variable independiente. En la práctica, las señales discretas suelen provenir de un muestreo periódico de una señal continua.

Si una señal continua puede tomar cualquier valor en un intervalo continuo, esa señal recibe el nombre de señal **analógica**. Si una señal discreta puede tomar únicamente un número finito de valores distintos, recibe el nombre de señal **digital**. Es importante no confundir que una señal sea analógica o digital con que los datos enviados sean de un tipo u otro. A continuación, se definen en detalle ambos tipos de señales.

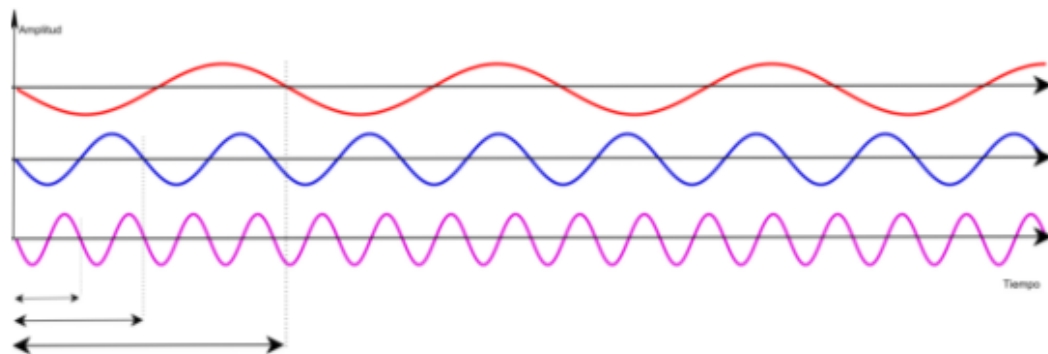
Las **señales digitales** son aquellas que están representadas por funciones matemáticas que pueden tomar un número *finito* de valores en cualquier intervalo de tiempo, es decir, toman valores discretos.

Las **señales analógicas** son aquellas señales representadas por funciones matemáticas que pueden tomar un número *infinito* de valores en cualquier intervalo de tiempo, es decir, que, en un instante cualquiera, pueden tomar un valor cualquiera, solo limitado por la potencia máxima de la señal a la que se puede transmitir. Los parámetros más significativos que definen una señal son la Amplitud (es el máximo valor que toma la señal respecto al origen), la Frecuencia (es el número de oscilaciones completas de la señal durante un cierto período de tiempo) y la Fase (indica el punto que ha alcanzado la señal en su ciclo).

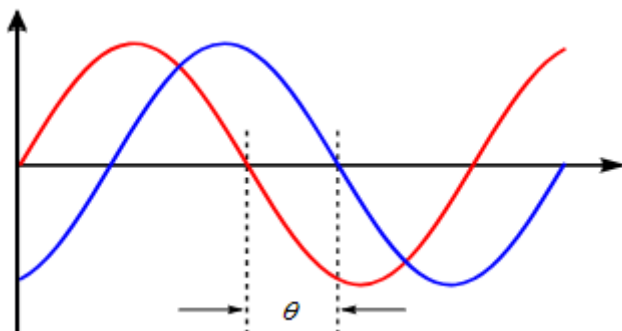
La **amplitud** pico es el valor máximo que una señal analógica puede alcanzar. En virtud de esa amplitud se pueden tener distintos tipos de señales, tal y como se muestra a continuación.



La **frecuencia** es la velocidad de cambio de la señal analógica respecto al tiempo. Una frecuencia alta indica que el tiempo que transcurre hasta que la función que rige la señal se repite es bajo. Si ese tiempo es mayor, la frecuencia será menor, tal y como se indica en la siguiente figura.



Finalmente, otro parámetro fundamental de las señales analógicas es su **fase**. La fase describe el ángulo inicial de la función sinusoidal que describe la señal, en el instante de tiempo 0. La señal puede en ese instante tener una forma u otra, como se ilustra en la figura, donde las señales tienen un desplazamiento de fase de valor θ .



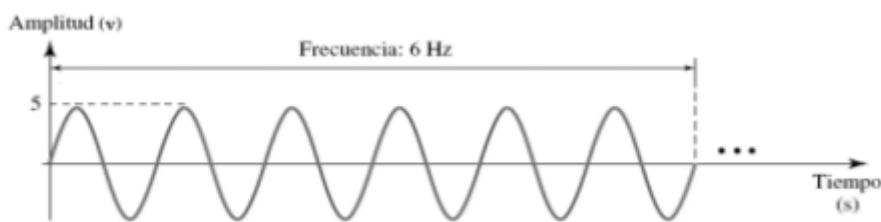
Modificando uno o varios de los parámetros de una señal analógica es posible transmitir datos entre sistemas, de tal forma se acuerde que un determinado cambio en la señal signifique la transmisión de una determinada información.

La amplitud, la frecuencia y la fase son parámetros generales que permiten describir una señal analógica, pero, en la mayor parte de casos, las señales que se emplean para transmitir información son tan complejas que para estudiarlas a fondo es necesario

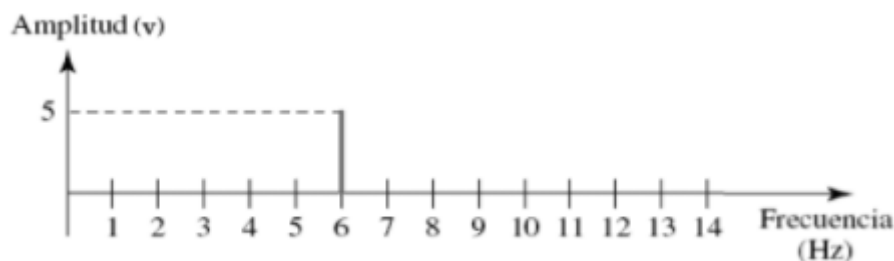
analizarlas más en detalle. Es necesario comprender que cualquier señal periódica es resultado de la suma de muchas señales sinusoidales (en algunos casos un número infinito de ellas), cada una con su amplitud, frecuencia y fase propia. Si la señal no es periódica se puede asumir que lo es y tiene un período infinito.

Esta forma de ver una señal como la suma de distintas señales sinusoidales permite ver cualquier señal no ya en función del tiempo (estudiando cómo cambia la señal en cada instante), sino en función del conjunto de señales sinusoidales en las que se descompone. Cada una de estas señales sinusoidales recibe el nombre de **armónico** y al primero de todos ellos se le denomina **armónico principal**. Se cumple el hecho de que la frecuencia del armónico principal es función directa de la velocidad con la que cambia la señal, y de que todos los demás armónicos resultan tener frecuencias múltiplo de la frecuencia de este armónico principal (su frecuencia es el doble, el triple, etc.). Existen por tanto dos formas equivalentes de representar una señal cualquiera:

- Representación en el **dominio del tiempo**: consiste en representar los cambios de la amplitud de la señal en función del tiempo. En la siguiente figura se representa una señal de 5v de amplitud y 6 Hz de frecuencia en el dominio del tiempo.



- Representación en el **dominio de la frecuencia**: consiste en representar la amplitud de los armónicos en los que se descompone una señal en función de la frecuencia. A continuación, se muestra la representación en el dominio de frecuencia de la misma señal anterior, de 5v de amplitud y 6Hz de frecuencia. Si esta señal contase con más de un armónico, sus valores de pico aparecerían en cada una de las frecuencias de esos armónicos.



Es conveniente resaltar que ambas representaciones son equivalentes (representan la misma señal). La representación de una señal en el dominio del tiempo permite analizar cómo cambia la señal en cada unidad de tiempo, mientras que la representación en el dominio de la frecuencia nos indica la amplitud y frecuencia de los armónicos en los que se descompone dicha señal, lo que resulta útil para comprender qué le ocurre a una señal cualquiera cuando es transmitida por un medio físico real que presenta determinadas limitaciones.

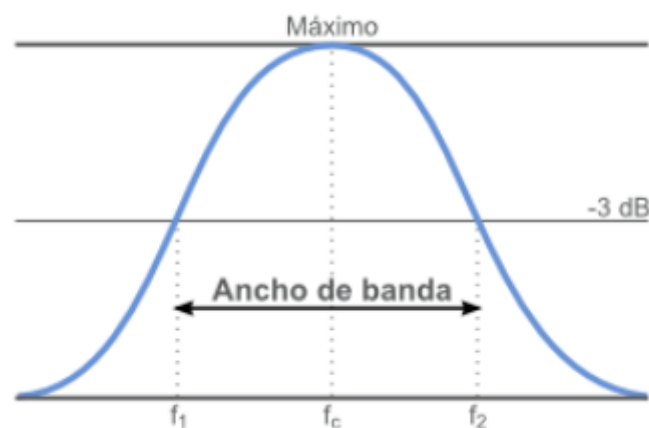
Al transmitir una señal por un medio físico cualquiera los armónicos que tengan frecuencias inferiores o superiores a la mínima o máxima transmisible no llegarán al destino. De esta forma cuantos menos armónicos podamos transmitir, la señal recibida cada vez se parecerá menos a la transmitida, llegando a un punto en el que la señal transmitida y la recibida pueden ser absolutamente irreconocibles.

Ancho de Banda

En el mundo real cualquier medio de transmisión (cable de cobre, fibra óptica, aire...) presenta una serie de limitaciones, entre las que se encuentra el rango de frecuencias que se pueden transmitir por él. Como consecuencia de las características físicas de un medio de transmisión, éste no permite transmitir señales de frecuencia inferior a una frecuencia dada (por ejemplo, en una fibra óptica no se propagan señales de baja frecuencia) ni superiores a una frecuencia máxima. A la diferencia entre la frecuencia máxima que se puede transmitir por un medio físico y la mínima se le denomina ancho de banda.

El **ancho de banda** en una señal analógica es la longitud, medida en Hz, del rango de frecuencias en el que se concentra la mayor parte de la energía de la señal.

Se define como **espectro** de una señal analógica al conjunto de frecuencias que la constituyen. La anchura de este espectro se denomina **ancho de banda**.



El rango de frecuencias contenido en una señal compuesta es el ancho de banda de dicha señal, el cual es normalmente la diferencia entre dos valores, la frecuencia más alta y la más baja contenidas en la señal. Si por ejemplo una señal contiene frecuencias entre 1000 y 5000 Hz, su ancho de banda es $5000 - 1000 = 4000$ Hz.

Una señal de una sola frecuencia tiene un ancho de banda mínimo. En general, si la señal tiene componentes en varias frecuencias, su ancho de banda es mayor, y su variación temporal depende de sus componentes en frecuencias. Normalmente, las señales generadas en los sistemas electrónicos, ya sean datos informáticos, voz, señales de televisión, etc., son señales que varían en el tiempo, pero se pueden caracterizar como la suma de muchas señales de diferentes frecuencias.

Como la frecuencia del armónico principal depende de la velocidad a la que cambia la señal y las frecuencias del resto de armónicos son múltiplos de este primer armónico, cuanto mayor es la velocidad a la que cambia la señal más ancho de banda se necesita para transmitir un número constante de armónicos. Por ejemplo, si el primer armónico tiene una frecuencia de

1Hz el octavo tendrá una frecuencia de 8Hz, mientras que si el primero tiene una frecuencia de 1MHz el octavo la tendrá de 8MHz.

De esta forma queda claro que el ancho de banda tiene una relación con la velocidad a la que cambia la señal y a su vez una relación con la velocidad máxima de transmisión de datos. Estas relaciones se detallan en el siguiente apartado.

1.2 Medios de transmisión. Capacidad de un Canal

Tal y como se ha explicado en la sección anterior, uno de los elementos principales que participa en toda comunicación entre sistemas es el medio de transmisión que los interconecta. Este medio puede ser desde un sencillo cable que conecta directamente dos sistemas remotos hasta una compleja red que conecta múltiples sistemas entre sí. El tipo de medio de transmisión empleado es el que dictamina qué señal emplear (analógica o digital), con independencia de los datos que se deseen intercambiar. El abanico de medios de transmisión que se pueden emplear hoy día es muy amplio, y elegir uno u otro depende de varios factores, tales como su coste, la distancia que debemos cubrir, los errores que podemos asumir en la transmisión, etc. Los principales medios de transmisión empleados en la actualidad son:

- Par trenzado: formado por dos conductores eléctricos entrelazados de forma helicoidal, suponen una solución económica, aunque con tendencia a sufrir atenuación y ruido, dos conceptos explicados a continuación. Existen varias categorías de cable, que proporcionan mejores prestaciones a cambio de un mayor coste. Por ejemplo, la categoría 5 (muy extendida en la actualidad) tiene un ancho de banda de 100 MHz, permite cubrir distancias de hasta 100 metros y transmitir una gran cantidad de datos en poco tiempo (hasta 100 Mbps).
- Cable coaxial: formado por un núcleo de cobre, un cilindro aislante, una malla metálica y una cubierta protectora, alcanza órdenes de ancho de banda de 500 MHz, y su uso se ha visto reducido a la distribución de señales de TV. Es un medio de transmisión con menos ruido que un par trenzado normal, gracias al aislamiento que incorpora para proteger su núcleo.
- Fibra óptica: formado por un fino hilo de material transparente por el que se envían pulsos de luz. Se logran anchos de banda muy elevados (superiores a 1000 MHz), y la rapidez de la transmisión es altísima. Pueden funcionar de dos formas: multimodo, de forma que existen varias formas de enviar haces de luz por el medio, y monomodo, donde el haz se propaga de una única forma posible, paralela al eje de la fibra. El multimodo se emplea en distancias cortas, y permite utilizar el mismo cable para múltiples comunicaciones, mientras que el monomodo se utiliza para conectar sistemas muy distantes (300 y hasta 400 km) de forma eficiente, aunque costosa. En cualquier caso, se trata de un medio que permite cubrir distancias muy elevadas, con poco ruido y atenuación.
- Medios inalámbricos: se emplean señales inalámbricas emitidas por el aire. Es un medio de transmisión de poco alcance, y sujeto a ruido y atenuaciones severas. Su coste se ve reducido a la compra de un emisor que sirva de punto de acceso a la red, y es una

solución muy versátil en un ámbito doméstico, pero es susceptible de sufrir intrusiones (dado que el medio es compartido con sistemas que se encuentren a su alcance).

Los distintos **medios de transmisión** descritos se pueden clasificar a su vez en función de distintos aspectos o criterios:

- En función de la **naturaleza** del medio de transmisión, el sistema de transmisión puede ser **guiado** o **no guiado**. Un medio guiado establece un camino físico entre una fuente y un destino concretos, como es en el caso de un par trenzado. Un medio no guiado permite la interconexión de fuentes y destinos que se hallen próximos, como es en el caso de una red inalámbrica.
- En función de la **disposición física** de los elementos del sistema, puede ser un sistema **punto a punto** o **multipunto**.
- En función del **intercambio de datos**, puede ser una transmisión **símples**, **semidúplex** o **dúplex**. En una transmisión símples las señales se transmiten en una sola dirección, por lo que una estación es siempre transmisora y la otra siempre receptora. En las transmisiones semidúplex, ambas estaciones pueden transmitir, pero no simultáneamente. Por último, en las transmisiones dúplex, las estaciones pueden transmitir de forma simultánea.

A su vez, se pueden encontrar diferentes posibilidades en la comunicación, en función del tipo de señal que viaja en el medio de transmisión y a las características de la señal manejada por el transmisor y el receptor. Existen una serie de factores que hay que tener en cuenta: la **potencia** empleada para transmitir la señal, la **banda de frecuencias** en que se transmite la señal, la cantidad máxima de **ruido** admisible, etc. Estos factores limitan la distancia máxima a la que se pueda reconocer la señal, a la máxima velocidad alcanzable. En los siguientes apartados se definen una serie de características propias del sistema de transmisión, las cuales van a permitir definirlo y categorizarlo dentro de las distintas posibilidades existentes. Estas características son la **velocidad de señalización**, el **ruido** existente en un canal, y la **capacidad** de dicho canal.

Velocidad de Transmisión y Velocidad de Señalización

Otra de las características fundamentales de un medio de transmisión es la cantidad de información que se transmite por unidad de tiempo, que se conoce como velocidad de transmisión de la información.

La **Velocidad de Transmisión** es el número de bits enviados durante un periodo de tiempo, y representa la velocidad a la que se puede transmitir la información. La Velocidad de Transmisión es igual a $1/T$ siendo T el tiempo necesario para transmitir 1 bit. La velocidad de transmisión se mide en bits por segundo (*Bits/s* ó *bps*).

$$C = \frac{1}{T} \text{ bps}$$

Otro concepto fundamental de un medio de transmisión, que no conviene confundir con la velocidad de transmisión, es la llamada velocidad de señalización.

La **Velocidad de Señalización** es el número de cambios de estado que puede sufrir la señal por unidad de tiempo. La Velocidad de Señalización es la inversa de T_s , siendo T_s el tiempo mínimo entre dos cambios de la señal. La Velocidad de Señalización se mide en *baudios*.

$$V = \frac{1}{T_s} \text{ baudios}$$

Ambas velocidades están relacionadas pero representan conceptos distintos. Su relación se encuentra en el número de bits de información que transporta cada cambio de señal, y que se denotará como n . Este número depende del conjunto de estados o valores que puede tomar la señal. Cuanto mayor sea el número de estados distintos que pueda tomar la señal (que se denotará N), mayor cantidad de información se transmite en cada cambio de estado. En concreto, el número de bits transmitidos por cada cambio de la señal es

$$n = \log_2 N$$

De esta forma, la velocidad de transmisión (medida en *bps*) se puede obtener como la velocidad de señalización (en *baudios*) multiplicada por el número de bits transmitidos en cada cambio de señal:

$$C = V * \log_2 N$$

Por lo tanto, no se debe confundir la velocidad en baudios con la velocidad en bits por segundo, ya que cada cambio de señal puede transportar menos de uno, uno o más bits. Por ejemplo, si la señal puede tomar 4 valores, éstos pueden ser codificados con 2 bits {00, 01, 10, 11} ya que $2 = \log_2 4$, y cada cambio de señalización se traduce en el envío de 2 bits. En este caso la velocidad de transmisión (en bits por segundo) será el doble de la velocidad de señalización (en baudios).

Perturbaciones en la transmisión

En todo sistema de transmisión, la señal que se recibe en destino no es exactamente igual a la señal que se transmitió, puesto que pueden surgir **perturbaciones** en la transmisión. Estas perturbaciones pueden ser atenuaciones, distorsiones o ruido:

- Una **atenuación** consiste en la disminución en *amplitud* de la corriente o potencia de una señal durante su transmisión entre dos puntos. Cuando una señal se desplaza por el medio físico, pierde parte de su fuerza electromagnética para vencer la resistencia del medio de transmisión. Esto produce que la señal recibida sea más tenue, y que a menudo sea necesario emplear amplificadores, tal y como ilustra la siguiente figura.



La atenuación de la señal se mide en *decibelios*, y mide la potencia relativa de la señal en dos puntos distintos, 1 y 2. La atenuación se expresa como:

$$\text{atenuación}_{(dB)} = 10 * \log_{10} \frac{Pot_2}{Pot_1}$$

siendo el punto 2 más lejano respecto del origen que el punto 1, por lo que $Pot_2 < Pot_1$. La atenuación siempre es un valor negativo.

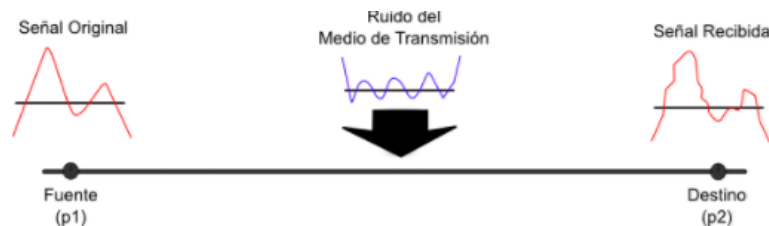
La atenuación, en dB, resulta uno de los valores asociados al medio de transmisión más relevantes a la hora de decidirse por emplear un tipo de medio u otro. Imaginemos que en una comunicación un emisor emite con una potencia cualquiera, medida en Watios, y debido al medio de transmisión empleado la señal recibida en el destino se ha visto reducida a la mitad. Esto significa que la potencia en destino (p_2) es igual a $p_1/2$. Si empleamos la expresión anterior se tiene que la atenuación es:

$$\text{atenuación (en dB)} = 10 \log_{10} p_2/p_1 = 10 \log_{10} 0.5 = -3 \text{ dB}$$

Por tanto en un medio de transmisión que se produzca esa atenuación, y la señal en destino llegue con la mitad de la potencia con la que se emitió, se tiene una atenuación de 3 dB, sea cual sea la potencia inicial empleada. La atenuación por tanto depende del medio de transmisión, y suele expresarse en función de la distancia que separa al equipo emisor y al equipo destino, de forma que es habitual encontrar que un parámetro estudiado en los medios de transmisión es la atenuación en dB que se produce por cada unidad de distancia cubierta (dB/m ó dB/km).

La atenuación en señales analógicas se corrige con amplificadores (que amplifican la señal en un número concreto de dB, en este caso un valor positivo), mientras que en señales digitales se corrige mediante regeneradores.

- Otro tipo de perturbación es la **distorsión**, que se produce debido a que el medio físico se comporta de forma diferente para señales de distinta frecuencia (diferentes atenuaciones y/o velocidades de propagación). La distorsión se produce en una señal compuesta, formada por varias frecuencias.



- Por último, el **ruido** consiste en señales no deseadas que pueden combinarse con la señal transmitida, y que por tanto provocan que la señal recibida sea diferente a la que se ha enviado. En la siguiente figura se ilustra el efecto de un ruido sufrido en el medio de transmisión.

Para cuantificar el grado en que este ruido puede afectar a una transmisión, se emplea el concepto de **relación señal/ruido** (S/R), la cual define la potencia relativa entre la señal y el ruido medidos en un punto determinado del medio de transmisión. La relación señal/ruido se expresa en decibelios y se calcula con la siguiente fórmula:

$$S/R_{(dB)} = 10 * \log_{10} \frac{Pot_{señal}}{Pot_{ruido}}$$

De esta forma, una S/R alta implica un bajo nivel de ruido, y por tanto una buena calidad de la señal.

Toda transmisión analógica está sometida a ruido, y para sobreponerse a este problema es necesario amplificar la señal original, reconstruirla (aunque no se puede reconstruir dicha señal por completo en el caso de señales analógicas) o emplear medios de transmisión que estén más protegidos del ruido, tales como la fibra óptica, o cableado aislado.

Capacidad de un canal

La **capacidad de un canal** se define como la velocidad máxima a la que se puede transmitir por dicho canal bajo unas condiciones dadas. Se mide en bits por segundo (*bps*) y depende del ancho de banda disponible y de la calidad de dicho canal (ej.: ruido).

A la hora de determinar la capacidad de un canal existen dos teoremas que permiten establecerla en función de las características del mismo. El *teorema de Nyquist* establece cuál es la capacidad máxima de un canal ideal en el que no existe ruido, mientras que el *teorema de Shannon* tiene en cuenta la relación señal/ruido del canal.

Canales sin ruido (Teorema de Nyquist)

El teorema de *Nyquist* define la máxima velocidad de transmisión teórica para canales sin ruido, en los que la única limitación viene impuesta por el ancho de banda del canal. *Nyquist* demostró que dado un canal con ancho de banda W , la máxima velocidad de transmisión de la señal que se puede alcanzar es de $2W$.

Si la señal es binaria, el teorema de *Nyquist* demostró que por un canal ideal de ancho de banda W se puede transmitir información digital a una velocidad máxima de $V = 2W$ bps.

Si se emplean sistemas de codificación de datos que permitan transmitir varios bits por cada nivel de la señal, la capacidad del canal puede expresarse como:

$$C = 2 * W * \log_2 N \text{ bps}$$

Donde N es el número de niveles que puede tomar la señal.

Por tanto, según las expresiones anteriores, se puede incrementar la capacidad del canal incrementando el ancho de banda o el número de niveles de la señal.

Formula correcta (general): $C = v * r$ $\begin{cases} v = 2w \text{ (Vmodulación max)} \\ r = \text{ratio (bits/cambio)} \end{cases}$

Ej: Un canal tiene un ancho de banda de 20Mhz y usa una codificación 4B5B (lo veremos más adelante), ¿cuál es la velocidad de transmisión del canal?

Nos están pidiendo C , en este caso como no nos especifican la V_{mod} calcularemos la $V_{\text{mod max}}$
Empleando la formula general (usar esta en los exámenes y ejercicios)

(T de Nyquist) $C = v * r$

$V_{\text{max}} = 2w = 40\text{Mhz}$

$r = 4/5$ (se transmiten 4 bits cada 5 cambios)

$C_{\text{max}} = 40\text{Mhz} * 4/5 = 32 \text{ Mbps}$

Canales con ruido (Teorema de Shannon)

Sin embargo, la realidad demuestra que todos los canales tienen ruido. La relación señal/ruido de un canal es el parámetro que influye en la máxima velocidad de transmisión por dicho canal. El teorema de *Shannon*, basándose en el teorema de *Nyquist*, definió una fórmula para determinar la máxima capacidad teórica de un canal en función del ancho de banda del medio y de la relación señal/ruido del mismo. Según *Shannon*, la máxima capacidad de un canal se obtiene de la siguiente manera. Partiendo del teorema de Nyquist, $C = V * r$ (bps), como el número de niveles transmitidos se ve limitado por el ruido, Shannon estableció que el número de niveles significativos es:

$$N = \sqrt{1 + S/R}$$

$$(\text{Nº niveles Máximo}) \text{ con } S/R \text{ en escala decimal: } \frac{S}{R} = 10^{\left(\frac{db}{10}\right)}$$

Si sustituimos dicha expresión en la fórmula de Nyquist se deduce que: $C = 2 * W * \log_2(1 + S/R)^{1/2}$ bps, fórmula que si se simplifica se obtiene:

$$C = W * \log_2(1 + S/R) \text{ bps}$$

Para un ancho de banda determinado, es deseable obtener la mayor velocidad de transmisión posible pero de forma que no se supere la tasa de errores aconsejable. Para conseguir esto, el mayor inconveniente es el ruido. Si el nivel de ruido fuese nulo (relación señal/ruido infinito), el número de niveles podría ser tan grande como se deseará, ya que siempre se podría distinguir entre un nivel y otros por próximos que estuvieran. Pero si el ruido no es nulo, es decir, el caso real, el número de niveles queda limitado por la posibilidad de cometer un error al decidir entre uno u otro nivel.

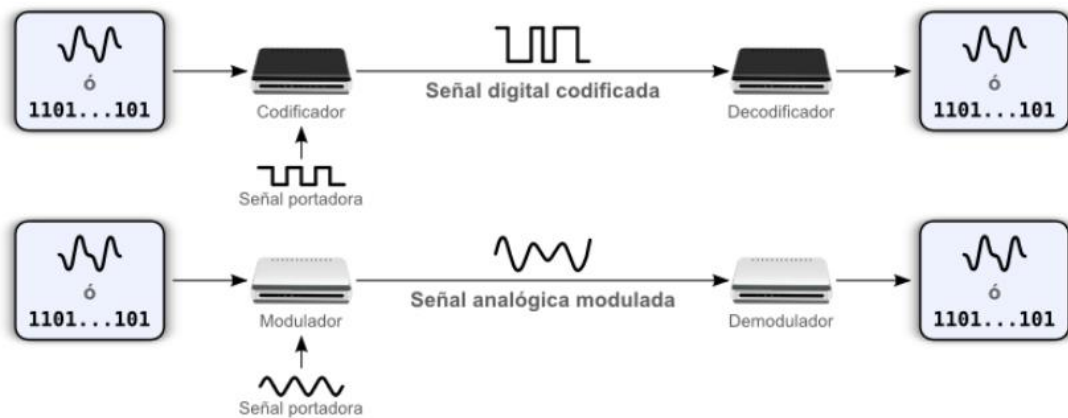
1.3 Técnicas de transmisión

Introducción a las técnicas de transmisión

Tanto la información analógica como la digital pueden ser transmitidas mediante señales analógicas o digitales. La elección de un tipo particular de señalización dependerá de los requisitos exigidos, del medio de transmisión, así como de los recursos disponibles para la comunicación, pero no del tipo de información a transmitir.

De esta forma, datos de tipo analógico pueden transmitirse mediante una señal analógica o digital, y datos digitales puede igualmente transmitirse mediante ambos tipos de señales. Cuando se emplean señales analógicas, la transmisión en sí recibe el nombre de **transmisión analógica**, mientras que si se emplean señales digitales se denomina **transmisión digital**.

En la siguiente figura se muestran estos dos tipos de transmisiones, así como los elementos que intervienen en ellas.



Es posible por tanto, realizar una transmisión digital de datos digitales o de datos analógicos, en cuyo caso la transmisión recibe el nombre de **codificación**, o realizar una transmisión analógica de datos digitales o de datos analógicos, en cuyo caso la transmisión recibe el nombre de **modulación**. Todas estas posibilidades se tratan en este apartado.

Transmisión digital

La transmisión digital consiste en el envío de información a través de medios de comunicaciones físicos en forma de señales digitales. Una señal digital es una secuencia de pulsos de tensión discretos y discontinuos. Cada uno de los pulsos es un elemento de la señal.

En la transmisión digital, una fuente de datos (que puede ser analógica o digital) es **codificada** en una señal digital. La forma real de la señal digital a transmitir depende de la técnica de codificación que se elige para optimizar el uso del medio de transmisión.

Se define la **codificación** como el proceso que establece la correspondencia entre los datos a enviar y los elementos de la señal digital transmitida.

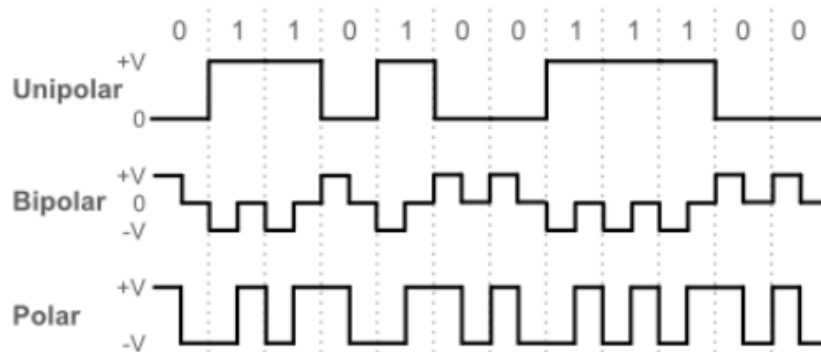
Transmisión digital de datos digitales

A continuación, se examinarán las técnicas de codificación involucradas para la transmisión de datos digitales en una transmisión digital. Los datos binarios son transmitidos codificando cada bit de datos en elementos de la señal.

En primer lugar, se va a introducir un poco de terminología. En función de los niveles de corriente utilizados para representar los valores, la codificación puede ser de distintos **tipos**:

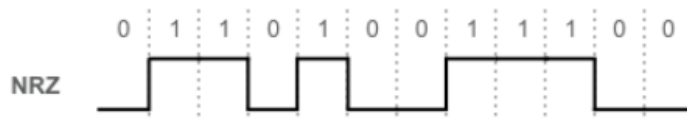
- **Unipolar:** codificación en la que un valor (por ejemplo, 1) es representado por un valor de señal distinto de 0, mientras que una señal a 0 representa el otro valor (por ejemplo, el 0).
- **Polar:** codificación que utiliza dos valores de voltaje distintos de cero, generalmente uno positivo y otro negativo, para representar los valores binarios

- **Bipolar:** codificación que emplea 3 niveles distintos de voltaje, dos niveles opuestos y un nivel neutro al que retornar.

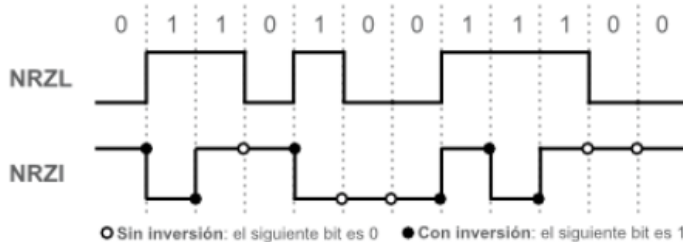


Existen por tanto tres tipos de codificación para pasar de datos binarios a señales digitales. Una vez escogido el tipo de codificación, se debe escoger el **método o esquema de codificación**, que indica cómo se utilizan los diferentes valores de la señal. Por tanto, cada tipo de codificación descrito (unipolar, bipolar o polar) puede luego emplearse con cualquiera de los siguientes métodos:

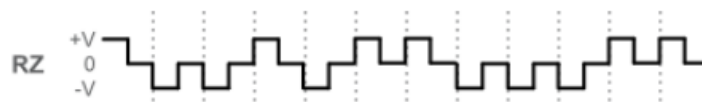
- **NRZ (No Return to Zero):** La forma más frecuente de transmitir señales digitales es mediante la utilización de un nivel de tensión diferente para cada dígito binario. Cada nivel lógico 0 y 1 toma un valor distinto de tensión, que se mantiene constante durante la duración del bit.



Los códigos NRZ tienen dos versiones de codificación diferentes, **NRZL** donde el voltaje determina el valor del bit, y **NRZI (No Return to Zero Inverted)** en el que la señal no cambia si se transmite un cero, y se invierte si se transmite un uno.

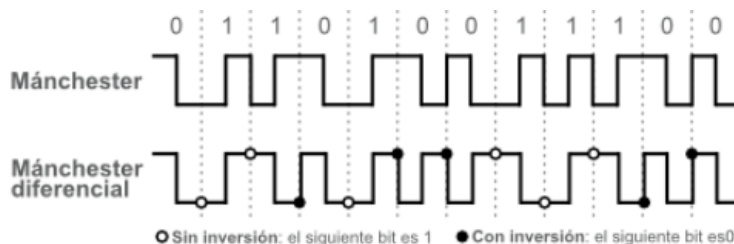


RZ (Return to Zero): Surge para resolver un problema del método NRZ: cuando se intenta transmitir con NRZ una larga secuencia de bits que no producen transiciones en la señal, provoca que el emisor y el receptor pierdan la sincronización. Para solucionarlo, la técnica RZ fuerza que haya cambios en la señal durante cada bit. Si el bit es uno, la primera mitad de la celda estará a V. Si el bit es cero, la primera mitad de la celda estará a algún valor de tensión distinto de V (dependiendo de la codificación usada). La señal vale cero en cualquier otro caso.



Los métodos NRZ y RZ requieren que emisor y receptor se sincronicen con precisión para enviar la señal y muestrearla en destino en el momento correcto, para reconocer cada bit enviado. Para no depender de esta sincronización, surgieron otros métodos de codificación que utilizan 2 fases: en cada bit se puede obtener la señal de reloj, lo que hace posible una sincronización precisa del flujo de datos. Su inconveniente es el de requerir el doble de ancho de banda. Estos mecanismos de dos fases son:

- **Mánchester:** Los valores lógicos no se representan como niveles de la señal, sino como transiciones en mitad del bit. Una transición de bajada de tensión representa un cero y una transición de subida representa un uno. Esta codificación siempre presenta un cambio de señal en mitad del intervalo, lo que sirve para ofrecer **sincronización** junto con la señal de datos. De esta manera, la señal le ofrece al receptor unos datos y además un mecanismo de sincronización.
- **Mánchester diferencial:** En esta técnica la transición a mitad del intervalo se utiliza tan sólo para proporcionar **sincronización**. La codificación del dato binario se representa por la presencia o ausencia de una transición al comienzo del bit: si el siguiente bit es 0, hay una transición; si el siguiente bit es 1, no la hay.



Cuando se emplean señales digitales para transmitir datos digitales, sea cual sea el tipo de codificación y el método empleado, suele surgir la necesidad de aumentar la eficacia de la transmisión. Es por ello por lo que surgen distintas técnicas de codificación, denominadas **codificación multinivel** que hacen uso de información emitida redundante para asegurar la sincronización de emisor y receptor y/o para poder detectar errores inherentes a la transmisión realizada. El uso de alguna de estas técnicas es independiente del tipo de codificación (Unipolar, polar, bipolar) y del método de codificación (NRZ, RZ, Manchester, etc.) empleado.

Estas técnicas consisten en dividir el flujo de datos en grupos de m bits, y sustituir estos m bits por n bits. El grupo de m bits se denomina palabra, mientras que el grupo de n bits resultante se denomina código. De esta forma, suelen enviarse más bits que los m bits originarios, siendo estos bits metainformación útil para sincronizar al receptor o para detectar errores provocados por el medio de transmisión.

Para poner nombre a estas técnicas se sigue un esquema de nombrado común, formado por dígitos y letras de la forma $mBnL$, donde m es el número de símbolos de B valores de entrada, y n es el número de símbolos de L valores de salida. B o L son letras que representan *símbolos binarios* (B), *ternarios* (T) o *cuaternarios* (Q). Entre los más utilizados están el esquema 2B1Q, que recibe dos símbolos binarios y genera un símbolo cuaternario,

4B5B, que genera 5 símbolos binarios partiendo de 4 símbolos también binarios; 8B6T, que para cada 8 bits de entrada genera 6 símbolos ternarios.

Ej: calculo de ratios para hallar C, 8B6T $\rightarrow r = 8/6$, 2B1Q $\rightarrow r = 2/1$... (solo importa los números)

Otro tipo de codificación multinivel es la llamada codificación en rejilla. Esta codificación permite corregir errores de transmisión, que son más frecuentes en codificaciones multinivel porque la diferencia entre elementos de información es mínima. El propósito de la modulación en rejilla es aumentar la fiabilidad de la transmisión, y para esto añade un bit redundante a cada símbolo; este bit se emplea para incrementar la relación señal/ruido efectiva. Algunos módems utilizan codificación en rejilla para incrementar la inmunidad al ruido en la red telefónica conmutada. A 9,6 kbps se pueden transmitir 32 símbolos de cinco bits con codificación en rejilla pero, cuando operan a 4,8 kbps, la codificación en rejilla se elimina para transmitir 16 símbolos de cuatro bits. La modulación con codificación en rejilla tolera más del doble de potencia de ruido que otras técnicas, pero exige, para implementar la codificación, procesadores de señal de alto rendimiento. El uso combinado de canceladores de eco para operación en dúplex sobre circuito a dos hilos de la red telefónica conmutada encarece bastante este tipo de módems.

Transmisión digital de datos analógicos

En este apartado se estudia la conversión de datos analógicos en señales digitales. Este proceso se denomina digitalización y puede realizarse mediante el mecanismo de **Modulación por Impulsos Codificados (MIC, o PCM** del inglés *Pulse Code Modulation*).

Se quiere transmitir un dato analógico que viene dado por una función continua en el tiempo (por ejemplo voz, audio, mediciones de sensores, etc.).

A esta señal analógica es preciso someterla primero a un proceso de **muestreo**. Es obvio que no se puede representar por impulsos el valor de la señal en todos los instantes, puesto que se obtendría un espectro continuo (números reales), confundiéndose unos impulsos con otros. Se deben elegir ciertos puntos de esa señal, separados por cierto intervalo de tiempo, y representar la amplitud que en ese momento tenga mediante un impulso cuya amplitud sea proporcional a ella.

Es importante destacar que, si el muestreo se realiza de forma correcta, las muestras no sólo representan una buena aproximación de la señal original, sino que contienen absolutamente toda la información de esa señal.

Esto queda reflejado en el **teorema de la teoría de muestreo**, según el cual, si una información que es una magnitud expresada como una función continua en el tiempo, se muestrea instantáneamente a intervalos regulares a una frecuencia que sea al menos dos veces la frecuencia más alta de dicha información, las muestras obtenidas contienen toda la información original.

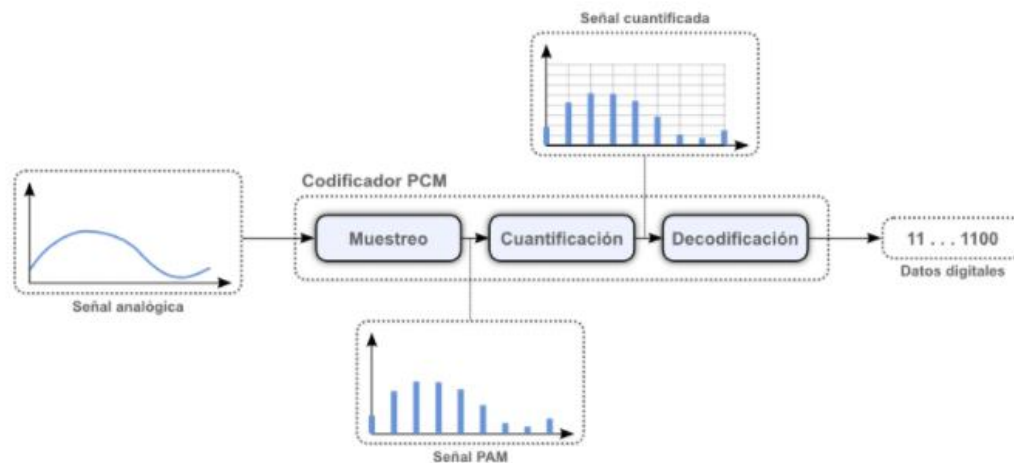
$$f = 2W$$

El paso siguiente es la operación de **cuantificación**. El conjunto de impulsos modulados en amplitud, que se obtiene como consecuencia del muestreo, presenta la característica de que la amplitud de tales impulsos varía de forma analógica, o lo que es lo mismo, pudiendo adoptar cualquier valor. Esto representa un importante inconveniente a la hora de asignar

una palabra del código utilizado que represente cada una de esas amplitudes, ya que se precisaría un sistema de codificación con infinitos valores posibles. Hay que conseguir que sólo exista un número discreto o finito de posibles valores, y para ello se deben cuantificar tales amplitudes. Esta operación introduce una inevitable *distorsión*, tanto mayor cuanto más elevado sea el intervalo entre valores cuánticos contiguos. Esta distorsión, no obstante, está perfectamente controlada, puesto que tendrá un valor constante en función de la escala de cuantificación que se elija, y bastará entonces con mantenerlo por debajo del límite que se estime conveniente, y que puede ser tan pequeño como se desee.

Por último, la tercera operación básica es la **codificación**. Consiste en sustituir cada valor cuántico (entero) resultante del proceso de cuantificación por una palabra del código de n bits de transmisión y se manda por la línea. Se obtiene así, por último, un tren de impulsos de amplitud fija.

El **códec** es el dispositivo encargado de realizar las tres etapas descritas: muestreo, cuantificación y codificación.



Al número de bits que transmite el códec en este proceso se le denomina **régimen binario**, que corresponde al número de bits que se transmiten por segundo a través del enlace de datos.

$$R_b = f * \text{numero de bits/muestra} \text{ bps}$$

donde f hace referencia a la frecuencia de muestreo.

Transmisión analógica

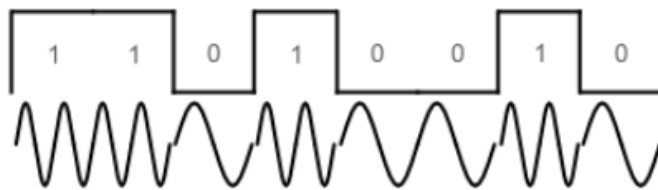
La transmisión analógica consiste en el envío de información mediante señales analógicas a través del medio físico. La fuente dispone de una serie de datos que se envían al equipo terminal de datos, y éste los transmite mediante una **onda portadora**, cuyo único objetivo es transportar datos modificando una de sus características (amplitud, frecuencia o fase).

El proceso por el cual se obtiene una señal analógica a partir de unos datos digitales es conocido como **modulación**. Esta señal modulada se transmite y el receptor debe realizar el proceso contrario, denominado **demodulación**, para recuperar la información.

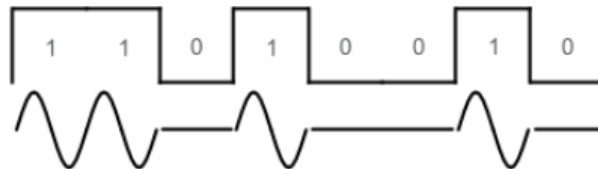
Transmisión analógica de datos digitales

En primer lugar, se va a considerar un escenario donde los datos de la fuente son digitales, y se van a transmitir señales analógicas por el sistema de transmisión. El **módem** es el encargado de modular los datos de la fuente, y para ello empleará algún esquema de modulación que involucrará a uno o más de los parámetros característicos de la señal portadora: la amplitud, la frecuencia y la fase. Algunos esquemas simples de modulación son:

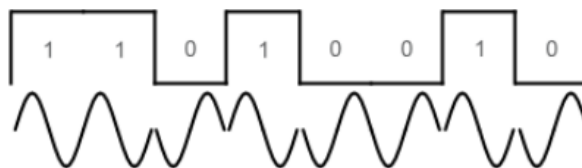
- **FSK** (Modulación por desplazamiento de la frecuencia): en ella los dos valores binarios, 0 y 1, se representan mediante dos frecuencias diferentes próximas a la frecuencia portadora. Se modifica por tanto la frecuencia de la portadora según el valor de bit a transmitir.



- En **ASK** (Modulación por desplazamiento de la amplitud), los dos valores binarios se representan mediante dos amplitudes diferentes de la portadora. Es usual que una de las amplitudes sea cero, y de esta forma, un dígito binario se representará mediante la presencia de una portadora de amplitud constante, y el otro mediante la ausencia de portadora. La técnica ASK suele emplearse para transmitir datos digitales en fibras ópticas.

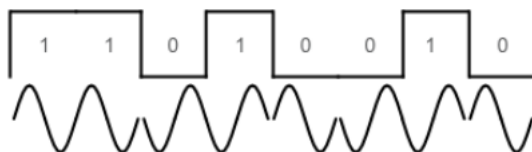


- En el esquema **PSK** (Modulación por desplazamiento de fase), la fase de la señal portadora se desplaza para representar los datos digitales. La frecuencia y la amplitud se mantienen constantes mientras que la fase de la portadora se varía para representar los bits uno y cero con distintos ángulos de fase. Para representar los dos datos digitales se utiliza una señal, y la misma señal desfasada 180°.



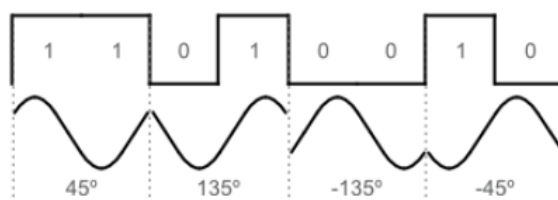
- **DPSK** (Modulación diferencial por desplazamiento de fase): es una variante de PSK en el que la fase que representa un bit depende de la fase del bit anterior. Por ejemplo, la

representación de un bit 0 provoca un desfase de 180° a la portadora, mientras que la representación de un bit 1 no realiza cambios en la portadora.



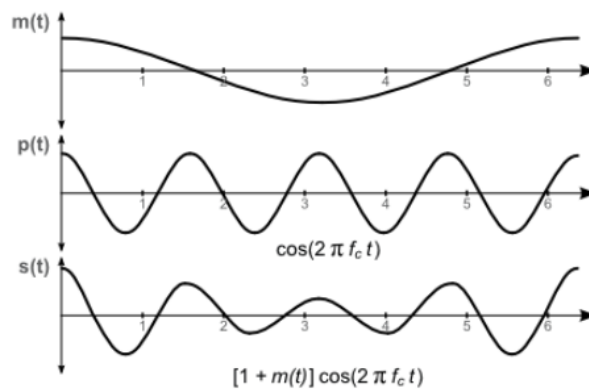
Todas las técnicas de modulación enumeradas hasta ahora se denominan **simples**, y en ellas los cambios de algún parámetro de la señal portadora sirven para distinguir dos valores lógicos, por lo que transmite un bit de información. No obstante, se hace imprescindible aumentar la eficacia de la transmisión, y por ello, surgen distintas técnicas de **modulación multinivel** que permiten transmitir más de 1 bit en cada cambio de parámetro de la onda portadora. De entre las técnicas multinivel existentes, las más importantes son:

- **QAM** (Modulación de amplitud en cuadratura): La modulación en cuadratura es una técnica en la cual se transmiten dos señales portadoras, sobre la misma línea; para que las señales no interfieran se envían con un desfase de 90 grados, de donde viene el nombre de cuadratura. Cada señal portadora transporta parte de la información mediante la modulación pertinente. Esto permite alcanzar velocidades mayores de transmisión de datos. QUAM, combina la PSK con la modulación en amplitud ASK.
- **QPSK** (PSK en cuadratura): Utiliza dos modulaciones PSK separadas, una en fase (fase 0°) que codifica los bits pares, y otra desfasada un cuarto de fase (90°), y que codifica el resto de bits (los impares). El resultado de la suma de ambas señales es una única onda sinusoidal, pero con desfases de 45° , -45° , 135° y -135° . Puesto que hay 4 fases distintas, cada cambio de fase representa dos bits, por lo que se envían 2 bits por cada cambio de señal.



Transmisión analógica de datos analógicos

También existe, obviamente, la posibilidad de enviar **datos analógicos** mediante una transmisión analógica. Este tipo de transmisión se refiere a un esquema en el que los datos que serán transmitidos ya están en formato analógico. Las técnicas empleadas para llevar a cabo este tipo de transmisión analógica son equiparables a las explicadas para datos digitales. Para transmitir la señal analógica de la fuente, el Equipo Terminal de Circuito de Datos debe combinar continuamente la señal que será transmitida y la onda portadora, de manera que la onda que transmitirá será una combinación de la onda portadora y la señal transmitida (como ejemplos de este tipo de modulaciones se pueden citar las modulaciones AM y FM usadas en las emisoras de radio). En la siguiente figura se muestra un ejemplo del funcionamiento de la modulación AM.



1.4 Distribución del ancho de banda

En la vida real, una propiedad característica de los enlaces existentes es que tienen el ancho de banda limitado. Esta propiedad, junto con el hecho de que el coste de implantación de un enlace no suele ser barato (es suficiente con pensar lo que pueden costar los enlaces que unen Europa con Estados Unidos, formados por un gran cable submarino que cruza el océano Atlántico), conlleva que la utilización eficiente del ancho de banda se convierta en un aspecto clave dentro de las Redes de Computadores.

Esta limitación del ancho de banda viene impuesta por las características físicas propias del enlace (no es lo mismo utilizar un cable coaxial que fibra óptica o un enlace inalámbrico), pero dicho tope nunca se alcanza y ocurre que el enlace dispone de más capacidad que la necesitada por los dispositivos conectados al mismo, con lo que se está malgastando la capacidad sobrante. Esta situación provoca un grave problema al desaprovecharse ancho de banda, uno de los recursos más preciados en las comunicaciones de datos.

Para optimizar el uso de la capacidad del enlace, en determinadas ocasiones se puede necesitar combinar varios canales de bajo ancho de banda para dar forma a un canal con un ancho de banda mayor. En otras, sin embargo, lo que se busca es evitar al máximo las interferencias y garantizar que los datos llegan a su destino sin ser interceptados por usuarios intermedios. Para dar respuesta a estas necesidades existen dos mecanismos fundamentales: la **multiplexación** y el **espectro expandido**.

Multiplexación

La multiplexación es una técnica que permite combinar las señales de varias fuentes para conseguir un uso *eficiente* del ancho de banda. En otras palabras, es una técnica que permite transmitir de forma simultánea múltiples señales analógicas o digitales a través de la compartición de un único enlace de datos, aprovechando al máximo la capacidad del mismo.

Para llevar a cabo esta tarea se emplea un dispositivo conocido como *multiplexor*, el cual combina los flujos de las diferentes líneas de entrada en un único flujo (*multiplexación*), y los separa de nuevo los flujos y los redirige a sus correspondientes líneas en la salida (*demultiplexación*).

Un aspecto importante que se debe tener claro a partir de ahora es que cuando se haga referencia a "*enlace*", se está haciendo referencia al camino físico por el que se transmiten los datos, mientras que cuando se hable de "*canal*" se está refiriendo a la porción de un enlace

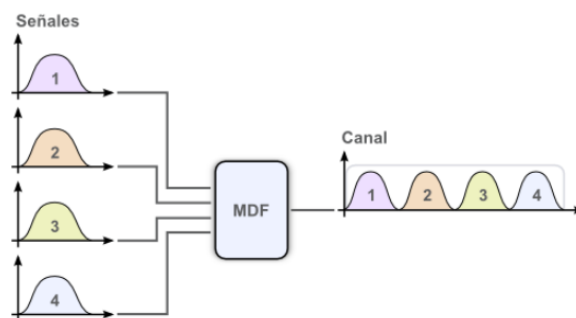
que transporta una comunicación entre un par concreto de líneas. Por tanto, un enlace puede estar formado por muchos canales.

Existen dos técnicas básicas de multiplexación, **multiplexación por división en frecuencia** y **multiplexación por división en el tiempo**, si bien existen otra técnica la cual se pueden encuadrar dentro de las anteriores: **multiplexación por división de longitud de onda** como un caso particular de la primera.

Multiplexación por división en frecuencia

Esta técnica de multiplexación, también conocida como FDM (*Frequency-Division Multiplexing*) fue diseñada para transmitir señales analógicas, y se puede aplicar siempre que el ancho de banda útil del enlace sea mayor que los anchos de banda combinados de las señales a transmitir.

Las señales que se desean transmitir, generadas por diferentes dispositivos fuente, ocupan el mismo espectro de frecuencias. El multiplexor modula (utilizando FSK) dichas señales utilizando distintas frecuencias portadoras, las cuales se combinan a continuación en una única señal compuesta que será la que se transmita por el enlace. A cada señal modulada se le asigna un subconjunto de frecuencias del enlace de datos, dando lugar a lo que se conoce como **canal**. Estos canales, para evitar que se solapen unos con otros, se separan con porciones de ancho de banda sin utilizar, llamadas **bandas de guarda**. En la figura siguiente se ilustra el funcionamiento de este tipo de multiplexación, así como la separación en frecuencias creando los canales y la separación existente entre ellos o bandas de guarda.



Una vez la señal multiplexada alcanza el extremo donde se debe demultiplexar, el multiplexor utiliza una serie de filtros que permiten descomponer dicha señal en las diferentes señales que la forman, para a continuación demodularlas y separarlas así de sus portadoras, obteniendo las señales originales, las cuales se redirigen hacia sus líneas de salida.

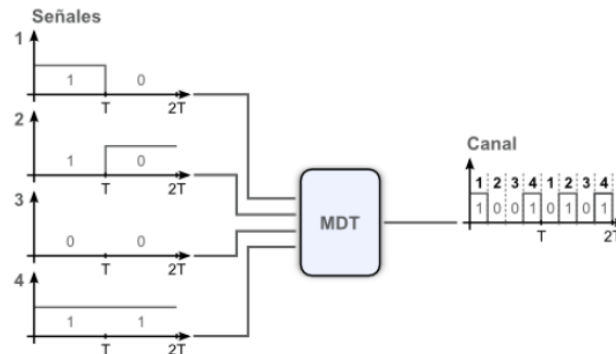
La aplicación más típica de la FDM se da en la radio y en la televisión, donde el aire se utiliza como medio de transmisión o enlace. En la radio, tanto en AM como en FM, la señal de audio de cada estación debe modularse, bien por amplitud o bien por frecuencia, para obtener las distintas frecuencias de portadoras, independientes unas de las otras, las cuales podremos sintonizar posteriormente desde nuestro equipo de radio.

Multiplexación por división en el tiempo

Existe un segundo tipo de técnica de multiplexación llamada **multiplexación por división en el tiempo** (o TDM, *Time-Division Multiplexing*) donde diferentes conexiones con señales digitales pueden compartir un mismo enlace, pero en esta ocasión aprovechando todo el

ancho de banda disponible y no sólo una parte del mismo como en FDM. Para ello, esta técnica comparte el enlace asignando un intervalo de tiempo en el que cada conexión puede utilizarlo.

El tiempo asignado para que cada línea de entrada transmita su información (un bit, un carácter, o un bloque de datos) se denomina **canal**.



La figura anterior ilustra el funcionamiento de esta técnica de multiplexación. Suponiendo que las líneas de entrada (1,2,3 y 4) tienen todas la misma velocidad de transmisión, el multiplexor obtiene una muestra del flujo de datos de cada una de las líneas durante un periodo de tiempo (T), con el objetivo de encapsular la información a transmitir en lo que se conoce como **trama**. Por tanto, las tramas, que conforman las unidades de información que se van a enviar por el enlace, están formadas por tantos canales como líneas de entrada haya, estando las posiciones de estos canales prefijadas de antemano.

Como el multiplexor obtiene datos cada T segundos, debe encapsularlos en la trama y enviar esta última por el enlace en ese mismo periodo de tiempo T . De esta forma, el multiplexor es capaz de transmitir una trama antes de recibir los datos necesarios para procesar la siguiente. Por tanto, la duración de transmisión de cada trama es T , lo que implica que los canales van a tener una duración de transmisión de T/n segundos, siendo n el número de líneas de entrada.

Dicho de otra forma, para garantizar la transmisión de los datos, el régimen binario (*bps*) en el enlace debe ser n veces mayor o igual que el existente en la línea de entrada. Es decir, si como ocurre en el ejemplo, hay tres líneas de entrada, el régimen binario del enlace debe ser tres veces más rápido que el de cada línea de entrada.

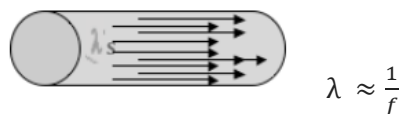
En el caso de tener señales analógicas en la entrada, TDM permite combinarlas basándose en que para transmitir una señal es suficiente con muestrearla y transmitir las muestras tomadas a una velocidad igual o superior al doble de su ancho de banda (realizado por el códec), como se hace en MIC. Para ello, el multiplexor irá obteniendo una muestra de cada una de las señales de las líneas de entrada y generará con ellas una trama, la cual enviará a través del enlace. De esta forma, se puede definir también la trama como el tiempo que transcurre entre dos muestras consecutivas de la señal de una misma línea de entrada.

Este tipo de TDM se conoce como *TDM Síncrona* y funciona muy bien, utilizándose sobre todo en compañías de telefonía móvil de segunda generación. Sin embargo, tiene la pega de que no es todo lo eficiente que podría ser, y ya se sabe que es primordial que el ancho de banda se comparta de forma eficiente. El problema aparece porque en la realidad, no todos los emisores permanecen continuamente transmitiendo, y al no tener datos que enviar, el canal correspondiente a la trama que se transmite estará vacío. Para resolver este problema

se emplea la **técnica de espectro expandido**, que aporta además seguridad y fiabilidad a la comunicación.

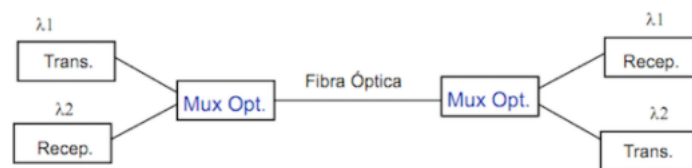
Multiplexación por división en longitud de onda

Existe una variante de la multiplexación por división de frecuencia pensada para aprovechar la gran capacidad ofrecida por los enlaces de fibra óptica. Esta variante, conocida como **multiplexación por división de longitud de onda** (o WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), permite transmitir diferentes señales ópticas sobre una misma fibra óptica empleando varias portadoras con diferentes longitudes de onda (y, por tanto, diferentes frecuencias). En esta técnica, los multiplexores son *multiplexores ópticos*.



Puesto que las frecuencias de las señales que viajan a través de una fibra son distintas, también lo son sus longitudes de onda (*lambda*). De hecho, en WDM se denomina *lambda* a cada una de las señales que se transmiten por una fibra, llegando a incluso a alquilar *lambdas* en enlaces ópticos.

Conceptualmente, FDM y WDM son iguales a excepción de que ésta última involucra señales ópticas transmitidas a través de fibra óptica.



Además de la WDM normal, existe la técnica **DWDM (WDM Denso)** la cual consigue una mayor eficiencia del enlace de fibra que la anterior, en base a que las señales ópticas que se introducen por la fibra, también denominadas *lambdas*, se encuentran más cerca unas de otras. Se considera que un sistema WDM es denso cuando la separación entre las longitudes de onda es menor a 2 nm.

La atenuación en la transmisión, medida en decibelios por kilómetro, es muy pequeña en la fibra óptica respecto a medios alternativos tales como el cableado metálico. Un estudio pormenorizado de dicha atenuación, y de sus orígenes (pérdidas por absorción del material en fibras de sílice, pérdidas por dispersión, etc.) muestra que existen tres rangos de longitudes de onda óptimas donde dicha atenuación es asumible: longitudes en torno a 850 micras (primera ventana de transmisión), en torno a 1320 micras (segunda ventana de transmisión) y en torno a 1550 micras (tercera ventana de transmisión). El primer rango de longitudes tiene una atenuación de unos 0.8 dB/Km, y el segundo y tercer rango una atenuación de unos 0.2 dB/Km. En la multiplexación por longitud de onda suelen emplearse ondas con longitudes comprendidas en alguna ventana de transmisión, y diferentes *lambdas* para cada una de las transmisiones.

Espectro Expandido

En los apartados anteriores se han explicado diversas técnicas que permiten aprovechar adecuadamente un ancho de banda dado, multiplexando comunicaciones en un mismo enlace de forma que su ancho de banda se comparta entre varios emisores. Con las técnicas de multiplexación se logra comunicar dos sistemas sin necesidad de tener un enlace dedicado en exclusiva a dicha comunicación, aprovechando al máximo el ancho de banda de dicho enlace.

No obstante, hay determinados tipos de transmisiones donde la prioridad se centra en aspectos como la seguridad y la fiabilidad de la comunicación, por encima de la idea de optimizar el uso del ancho de banda. Un ejemplo claro de ello son las comunicaciones inalámbricas, cada vez más utilizadas hoy en día. Los datos, ya sean personales o empresariales, viajan usando como medio de transmisión el aire y cualquier sistema puede tener acceso físico a los mismos. Por tanto, se hace imprescindible:

- Minimizar las interferencias sufridas por ruido casual o provocado por emisores malintencionados
- Evitar la interceptación de los datos por parte de usuarios intermedios
- Mejorar la recepción de la información por parte del receptor, aunque existan varios usuarios independientes emitiendo a la vez

Si no se logran cumplir estos requisitos, las soluciones inalámbricas no tendrían validez en el ámbito de las comunicaciones, y precisamente para dar respuesta a esos problemas surge la técnica de Espectro Expandido, ideada para un ámbito militar donde se pretendía cifrar las transmisiones para que no pudieran ser interferidas ni interceptadas por el bando enemigo.

El espectro expandido persigue conseguir que una comunicación sea **resistente a las interferencias externas** y a la **intercepción**. Para ello, va a ser necesario emplear un ancho de banda mayor que el que exige realmente la comunicación en sí, con lo que se va a perder ancho de banda en favor de aumentar la seguridad/fiabilidad de la transmisión. Es como si se envía un objeto muy delicado por mensajería: tenemos la opción de meterlo en un envoltorio que se ajuste al tamaño, ahorrando dinero en el envío, o bien, de envolverlo cuidadosamente en corcho, plástico contra golpes, caídas, etc., con lo que tendremos que enviar un paquete mucho mayor (nos supondrá mayor coste) pero más seguro.

Nos encontramos, por tanto, ante una problemática distinta a la que trataba de resolver la multiplexación, donde se pretende optimizar el ancho de banda de cada comunicación a fin de poder entremezclar varias transmisiones y aprovechar al máximo el canal utilizado.

Si la estación emisora requiere un ancho de banda W para llevar a cabo el envío de datos, la técnica de espectro expandido va a utilizar un ancho de banda W_{ss} cumpliéndose que $W_{ss} \gg W$ (*mucho mayor*). Además, la expansión deliberada del ancho de banda se realiza mediante algún mecanismo conocido tanto por el emisor como por el receptor. Con este desaprovechamiento de ancho de banda se logrará, como se explica a continuación:

- Inmunidad ante interferencias
- Ocultar/cifrar la señal ante intrusos
- Permitir que usuarios independientes usen el mismo ancho de banda y el mismo medio (el aire) sin interferir unos con otros. Se combinan señales de varias fuentes, como en la

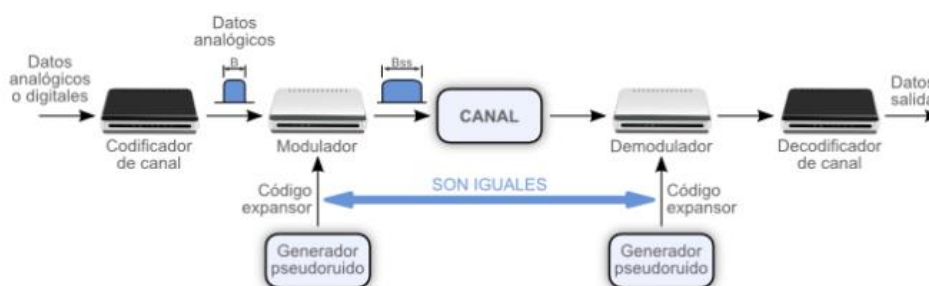
multiplexación, pero el objetivo fundamental es que múltiples emisores utilicen simultáneamente el mismo ancho de banda sin necesidad de coordinarse entre ellos

Existen hoy día dos tipos de técnicas de espectro expandido que cumplen con los objetivos y los requisitos descritos anteriormente:

La técnica de espectro expandido por **salto en frecuencias** transmite una señal sobre una serie aparentemente aleatoria de frecuencias portadoras distintas, saltando de una frecuencia a otra provocando que posibles intrusos pierdan el rastro de la comunicación y les sea imposible escucharla o interferirla usando una frecuencia constante.

La técnica de espectro expandido por **secuencia directa** es una variante más moderna en la que cada bit de la señal original se representa con un código de varios bits en la señal transmitida. Esto impide que los intrusos puedan descifrar la señal original y minimiza los efectos de interferencias casuales o intencionadas.

Ambas técnicas de espectro expandido permiten transmitir datos analógicos o digitales, haciendo uso de una señal analógica, según el esquema mostrado a continuación.



La señal de espectro expandido, una vez expandida, puede coexistir con otras comunicaciones en un mismo enlace, ya que éstas sólo implican un pequeño incremento en el ruido. Cualquier otra comunicación simultánea no es más que una fuente de interferencias, y la técnica de transmisión por espectro expandido fue diseñada para resistir cualquier tipo de interferencia.

La técnica de espectro expandido se emplea actualmente en todo tipo de transmisiones inalámbricas (telefonía, Bluetooth, Wifi, etc.), en numerosas aplicaciones militares y en comunicaciones GPS.

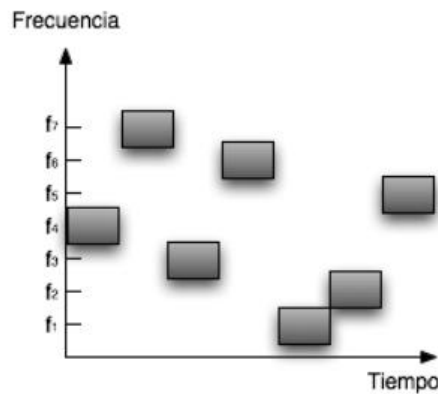
Espectro expandido por salto de frecuencias

La primera técnica de espectro expandido que surgió fue la **expansión por salto de frecuencias**. Con la idea de lograr que una transmisión sea más fiable y segura, y pueda ser resistente a las transferencias y las interceptaciones, esta técnica pretende evitar que toda la comunicación se realice en una única frecuencia de transmisión analógica concreta. Si un intruso detectase la frecuencia exacta a través de la cual el emisor se comunica con el receptor, podría interceptar fácilmente los datos enviados, o simplemente producir ruido en dicha frecuencia y arruinar la transmisión.

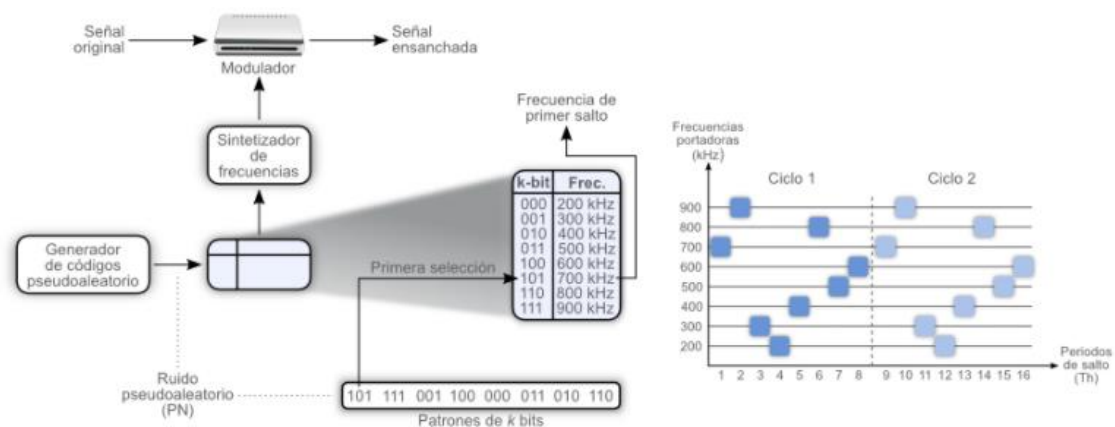
Inventora de la técnica: http://wikis.fdi.ucm.es/ELP/Hedy_Lamarr

Por ello, esta técnica se basa en emplear M frecuencias portadoras distintas entre ellas, y en cada instante de la comunicación, ir cambiando la transmisión de una frecuencia portadora

a otra, para evitar que un intruso pueda seguirnos el rastro entre salto y salto. Como se puede ver en la siguiente figura, el emisor va a emplear una frecuencia distinta en cada intervalo de tiempo: en el intervalo 1 empleará la frecuencia 4, en el intervalo 2 la frecuencia 7, y así sucesivamente. Dado que se van a emplear 8 frecuencias portadoras distintas, a partir del intervalo de tiempo 9 se volverán a emplear las mismas frecuencias y se repetirá el ciclo de saltos por frecuencias.

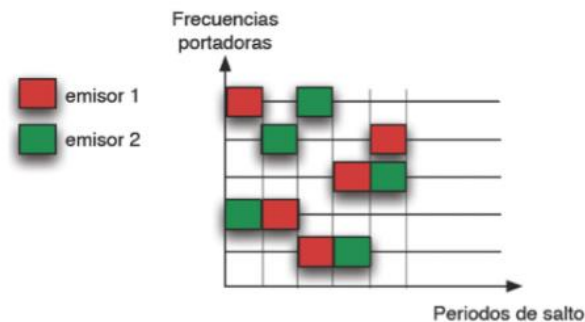


El ancho de banda del medio de transmisión empleado al usar esta técnica va a ser mucho mayor que el ancho de banda normalmente requerido para transmitir dicha señal. Imaginemos que el emisor puede transmitir en una frecuencia de 100 kHz, y sin embargo, se va a usar un rango de frecuencias de 2000 a 9000 kHz para permitir que el emisor transmita sobre una serie de radiofrecuencias aparentemente aleatoria. Se cumple que $B_{ss} =$ de 2000 a 9000 kHz $\gg W = 100$ kHz, es decir, se "desaprovecha" ancho de banda a favor de aumentar la seguridad y fiabilidad de la transmisión. El receptor captará el mensaje saltando de frecuencia en frecuencia transmisora ya que comparte la secuencia de saltos con el emisor, y sabe en qué frecuencia escuchar en cada momento. Todos los receptores no autorizados escucharán una señal ininteligible, ya que sólo conseguirían unos pocos bits de la comunicación, pero no saben dónde buscar el resto. Además, si el intruso emitiera un ruido por una frecuencia dada (por ejemplo 7000 kHz), ese ruido solo afecta a un conjunto pequeño de datos de la transmisión, sin interferir en el resto.

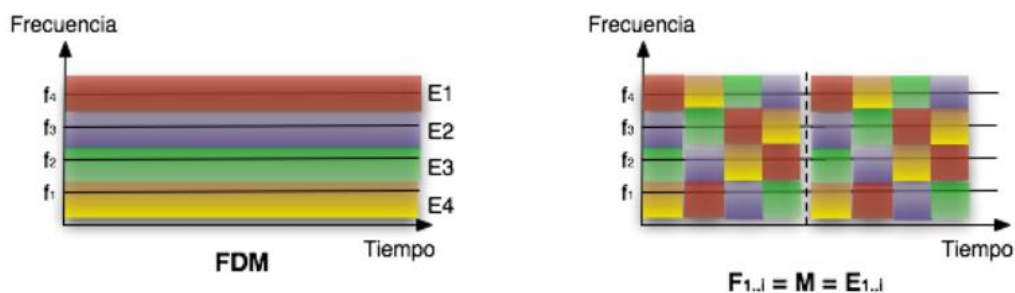


Finalmente, cabe destacar que el desaprovechamiento del ancho de banda que provoca esta técnica es muy amplio cuando una sola estación se encuentra emitiendo datos. Sin embargo, si existen más estaciones emisoras, es posible multiplexar sus comunicaciones con saltos por frecuencias que no emitan por la misma frecuencia portadora en el mismo intervalo de

tiempo. En la siguiente figura, se muestra un ejemplo en el que dos estaciones saltan por las mismas frecuencias sin colisionar la una con la otra.



Usando este principio, si hay M frecuencias de salto se pueden llegar a multiplexar M estaciones emisoras, usando una modulación coordinada entre ellas. De hecho, empleando esta multiplexación es fácil comprobar que los saltos de frecuencias de las M estaciones emisoras por M frecuencias portadoras ofrecen resultados similares a una multiplexación FDM (multiplexación por división de frecuencias), pero añadiendo seguridad ante intrusos.



Espectro expandido por secuencia directa

El **espectro expandido por secuencia directa** es una técnica más moderna que el espectro expandido por salto de frecuencias. En ella se expande el ancho de banda de la siguiente forma: cada bit de información se sustituye por n bits, que en esta técnica se van a denominar **chips**. Cabe destacar que la tasa de transmisión de estos chips es n veces la tasa de envío de los bits originales.

El emisor y el receptor de la transmisión compartirán un código de expansión que permitirá transformar cada 1 ó 0 de información en un conjunto de n chips, y a su vez revertir la traducción para obtener los datos originales.

Esta técnica es muy usada en conexiones inalámbricas de área local (WiFi), donde se usa una secuencia Barker, que establece que el número n de chips es igual a 11, y el código emplea una codificación polar de tipo NRZ. De esta forma, es habitual que cada bit se expanda a 11 chips, lo que supone una expansión del ancho de banda considerable. El esquema empleado en dicha expansión es el siguiente:

En este ejemplo, la tasa de la señal original es N , la tasa de la señal nueva es $11/N$ y por tanto, W_{ss} es 11 veces mayor que el ancho de banda W requerido por la comunicación original.

El uso más extendido de éste tipo de técnicas es el llamado Acceso Múltiple por División por Código (**DCMA** del inglés *Code Division Multiple Access*), base de la telefonía móvil de 3ª generación. CDMA es una implementación de espectro expandido por secuencia directa en el que cada bit se sustituye por un código de expansión (o su inverso).

A continuación, se muestra un ejemplo simplificado donde el número de chips es 6, y se pretenden transferir 3 bits de datos:

- Código: 1, -1, -1, 1, -1, 1
- Datos: 1 0 1 (3 bits)
- Transmisión 1,-1,-1,1,-1,1 -1,1,1,-1,1,-1 1,-1,-1,1,-1,1 (18 chips)

Como puede comprobarse, se transmite el código de expansión por cada bit "1" encontrado en los datos, y el código invertido por cada bit "0".

El receptor decodifica la transmisión calculando el resultado de multiplicar los valores recibidos por el código del emisor (bit a bit) y sumando los resultados (producto **escalar**)

- Transmisión 1,-1,-1,1,-1,1 -1,1,1,-1,1,-1
- Código: 1,-1,-1,1,-1,1 1,-1,-1,1,-1,1
- Resultado: 1+1+1+1+1+1 -1-1-1-1-1-1
- Si el resultado es 6 se ha transmitido un 1, si es -6 se ha transmitido un 0

Las implicaciones de usar esta técnica son simples: se desaprovecha el ancho de banda, pero si un intruso desconoce el código expansor, no va a ser capaz de interpretar la señal transmitida. Si además, ese intruso introduce ruido en la transmisión, el receptor tal vez no reciba un 6 por cada bit 1 transmitido, pero probablemente hallará un 4 ó un 5 como resultado del producto escalar. Esos valores distan mucho del resultado -6, con lo que entenderá el valor como un 1 igualmente.

Ahora bien, ¿es posible multiplexar las emisiones de varias estaciones que empleen esta técnica para minimizar así la pérdida de ancho de banda y evitar a su vez que interfieran entre ellas? Este escenario es similar a cuando varias personas se juntan en un mismo recinto y hablan unos con otros todos a la vez. En estos casos, solo el hecho de que los distintos interlocutores hablen distintos idiomas permite que cada persona se centre sin interferencias en recibir aquello que su emisor le está comunicando.

En el caso de querer compartir el medio de transmisión entre múltiples emisores y receptores, es igualmente necesario que cada pareja emisor-receptor utilice un código de expansión propio y distinto al del resto de emisores-receptores. Para ello es necesario emplear códigos expansores específicos para cada emisor, utilizando en la medida de lo posible, códigos ortogonales que permiten que cada estación receptora sólo pueda oír al emisor deseado.

Imaginemos una estación emisora A cuyo código expansor es $C_A = 1, -1, -1, 1, -1, 1$, y una estación B cuyo código expansor es $C_B = 1, 1, -1, -1, 1, 1$.

Supongamos que B envía un 1. Los datos enviados serán **1, 1, -1, -1, 1, 1**. Imaginemos que el receptor de la transmisión de A recibe estos datos (es decir, que B interfiere en la transmisión que el receptor de A está manteniendo con A). Al aplicar el código expansor de C_A a esos datos se obtiene:

$$1 \times 1 + 1 \times (-1) + (-1) \times (-1) + (-1) \times 1 + 1 \times (-1) + 1 \times 1 = 0$$

Es decir, la señal no deseada de B no puede ser comprendida por el receptor de A gracias al código de A. Igualmente ocurre si B transmitiera un 0 en lugar de un 1. Esto ocurre porque los códigos de expansión de A y B (C_A y C_B) son ortogonales.

Imaginemos ahora una estación emisora C cuyo código expansor es $C_C = 1, 1, -1, 1, 1, -1$. Esa estación C emite un 1, comprobemos ahora cual es el resultado que le llega a la estación receptora de la comunicación A:

$$1 \times 1 + 1 \times (-1) + (-1) \times (-1) + 1 \times 1 + 1 \times (-1) + (-1) \times 1 = 0$$

Es decir, la estación receptora A no puede recibir la transmisión de C, aunque sí la de la estación emisora A a la que escucha.

Por último, se va a comprobar qué detectaría la estación receptora B, con su código concreto C_B , ante la emisión de un 1 por parte de la emisora C:

$$1 \times 1 + 1 \times 1 + (-1) \times (-1) + 1 \times (-1) + 1 \times 1 + (-1) \times 1 = 2$$

En este caso, la emisora que está escuchando a B recibe un 2 por culpa de una interferencia de la emisora C. No obstante, 2 es muy similar a 0 y difiere mucho de un 6, por lo que el receptor de B puede "ignorar" esta interferencia de C. Esto es debido a que C_C y C_B no son exactamente ortogonales, debido a que las secuencias de expansión que cumplen la propiedad de no interferirse son escasas.

No obstante, estos códigos expansores con cierta ortogonalidad permiten que varios emisores emitan sin interferir entre ellos y sin la necesidad de haberse puesto previamente de acuerdo entre sí. El uso de estos códigos recibe el nombre de acceso múltiple por división de código, y es una forma de lograr que varios emisores que empleen expansión de espectro por secuencia directa puedan multiplexar sus comunicaciones a través del mismo medio.

1.5 Técnicas de transmisión de datos digitales

La transmisión de una cadena de bits desde un dispositivo a otro a través de una línea de transmisión implica un alto grado de cooperación entre ambos extremos. Uno de los requisitos esenciales es la *sincronización*: el receptor debe saber la *velocidad* a la que se van a recibir los datos de tal manera que pueda muestrear la línea a intervalos constantes de tiempo para así determinar cada uno de los bits recibidos.

La **sincronización** consiste en permitir que los tiempos de funcionamiento de dos sistemas distintos lleven el mismo ritmo, de forma que puedan realizar tareas complementarias de manera coordinada y simultánea.

Se denomina, por tanto, sincronización al proceso mediante el cual un emisor informa a un dispositivo receptor sobre en qué momento se van a transmitir las correspondientes señales. En este proceso de sincronización se pueden distinguir tres niveles:

- Sincronización a *nivel de bit*: Debe reconocerse el comienzo y el fin de cada bit.
- Sincronización a *nivel de carácter o palabra*: Debe reconocerse el comienzo y el final de cada unidad de información, como puede ser un carácter o una palabra transmitida.
- Sincronización a *nivel de bloque o mensaje*: Debe reconocerse el comienzo y el final de cada bloque de datos (conjunto de palabras o caracteres).

En general, los diferentes tipos de sincronización pueden conseguirse de dos maneras diferentes: mediante técnicas de **transmisión síncrona** o **asíncrona**.

Del mismo modo, además de la coordinación en la velocidad de transmisión, es posible llegar a niveles más altos de cooperación de forma que la transmisión pueda recuperarse de pérdidas de información o de corrupción en los datos en la misma. Para ello, se emplearán técnicas de detección y corrección de errores que conllevarán generalmente reenvíos de datos perdidos o extraviados.

Transmisión asíncrona

Una forma de coordinar al emisor y al receptor durante la transmisión de datos es utilizar la denominada **transmisión asíncrona**, en la que cada carácter se envía de forma independiente al resto. Al inicio de un nuevo carácter se añade al menos un bit de comienzo. Éste alerta al receptor del inicio de ese nuevo carácter.

La **transmisión asíncrona** se da lugar cuando el proceso de sincronización entre emisor y receptor se realiza en cada palabra de código transmitido. Esta sincronización se lleva a cabo a través de unos bits especiales que definen el entorno de cada código.

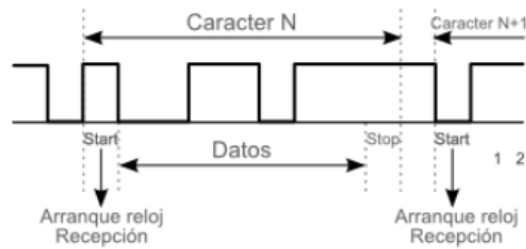
En este tipo de transmisión, el receptor no sabe con precisión cuando recibirá un carácter (y de aquí su denominación de asíncrona). Cada carácter transmitido está delimitado por al menos un bit de información, denominado "*de cabecera*" o "*de arranque*", y al menos otro bit denominado "*de terminación*" o "*de parada*".

El bit de arranque tiene las funciones de sincronización de reloj, al identificar el inicio del carácter en el origen y en el destino, mientras que el bit de parada se usa para indicar que ha finalizado carácter.

Partiendo desde la línea de transmisión en reposo (cuando tiene el nivel lógico 1), el emisor informa al receptor de que va a llegar un carácter. Para ello, antepone al menos un bit de arranque (*Start*) con el valor lógico 0. Una vez que el bit *Start* llega al receptor, este disparará un reloj interno y se quedará esperando por los sucesivos bits que contendrá la información del carácter transmitido por el emisor.

Una vez que el receptor recibe todos los bits de información, se añadirá al menos un bit de parada (*Stop*) de nivel lógico 1, que repondrá en su estado inicial a la línea de datos, dejándola así preparada para la transmisión del siguiente carácter.

Este tipo de transmisión se utiliza con velocidades de modulación relativamente bajas (típicamente velocidades del orden de kilobits). Si se calcula el rendimiento para una transmisión que se basa en el uso de un bit de arranque y dos de parada, en una señal que use código de 7 bits más uno de paridad se transmitirán 7 bits de datos reales sobre 11 transmitidos totales, lo que supone el 64% de datos reales en la transmisión total.



Las **ventajas** y **desventajas** de este modo asíncrono son las siguientes:

- En caso de la existencia de errores, siempre se produce la **pérdida** de una cantidad pequeña de caracteres, pues éstos se sincronizan y se transmiten de uno en uno.
- Se da un **bajo rendimiento de transmisión**, dada la proporción de bits útiles y de bits de sincronismo que hay que transmitir por cada carácter.
- Son especialmente **aptos** cuando no se necesitan lograr altas velocidades.

Transmisión síncrona

La técnica de transmisión **síncrona** permite que el origen y destino colaboren adecuadamente durante transmisiones de bloques de información largos, en los que la técnica asíncrona presenta carencias. En la técnica síncrona se forma una trama con cada bloque de datos, que incluirá, entre otros campos, los delimitadores de principio y de fin. Adicionalmente, las tramas podrán emplear más campos de control que permitan coordinar los sistemas remotos para solucionar otros problemas adicionales, como por ejemplo para corregir errores.

La **transmisión síncrona** es una técnica que consiste en el envío de una trama de datos (conjunto de caracteres o de bits) que conforma un bloque de información, comenzando con un conjunto de bits de sincronismo (uno o varios caracteres o una secuencia especial de bits) y terminando con otro conjunto de final de bloque (uno o varios caracteres o una secuencia especial de bits).

A continuación, se muestra un formato típico de trama en una transmisión síncrona.



Tipos de delimitadores:

- Principio y cuenta: Un bit de inicio seguido de un número que indica el nº de bits que se van a transmitir en esa trama
- Indicadores de comienzo y fin: bit start, bit stop (suelen ser caracteres)
- Guiones: chorro de bits que indican comienzo y fin

La trama comienza con un delimitador (carácter o *flag*) de inicio, que permite coordinar al emisor con el receptor, a la vez que habilita que el receptor sepa cuándo muestrear la línea. El final del bloque (trama) se delimita empleando un carácter de fin o el mismo delimitador (*flag*) empleado para delimitar el inicio, indicando al receptor que la información acaba y que por tanto puede finalizar su muestreo. Tras el delimitador de inicio, aparecerán algunos campos de control que permitirán que cuando el protocolo lo exija, se envíe información adicional entre extremos. También es posible encontrar cabeceras de control al final de la trama, tras los datos a enviar. Por último, aparece el campo de los datos que el emisor envía al receptor.

Técnicas de detección y corrección de errores

En la transmisión de datos digitales se pueden producir fallos que alteran o eliminan uno o más bits en los datos transmitidos. Estos errores de transmisión son debidos a múltiples factores, siendo el ruido de la línea el más típico. Dependiendo del medio de transmisión y del tipo de codificación empleado, se pueden presentar otros tipos de anomalías como ruido de redondeo y atenuación, así como cruce de líneas y eco. Diversas aplicaciones como las transmisiones multimedia toleran una cierta cantidad de errores, pero para que muchas otras aplicaciones funcionen correctamente, las redes han de ser capaces de detectar y/o corregir los errores producidos en la transmisión.

Los errores producidos en la transmisión pueden ser **errores de bit**, que modifican el valor de un único bit, o **errores de ráfaga**, que afectan a una secuencia de bits, aunque no implica que se modifiquen todos los bits de dicha secuencia. Los errores de ráfaga son más comunes porque, normalmente, la duración del ruido o perturbación en la línea es muy superior al tiempo de transmisión de un único bit.

Para poder detectar o corregir errores de transmisión el emisor introduce una carga extra en la transmisión, denominada **redundancia**. Esta redundancia implica transmitir bits extra junto a los datos, y es eliminada por el receptor.

Existen diversas técnicas para detectar y corregir este tipo de errores, las cuales se clasifican en función del mecanismo de control de errores al que se pueden aplicar:

- **ARQ** (*Automatic Repeat Request*)
- **FEC** (*Forward Error Control*)

ARQ se basa en detectar los errores en su recepción, generalmente mediante códigos de paridad o códigos polinómicos, solicitando al origen que retransmita los datos dañados. El mecanismo FEC, sin embargo, permite que el destino detecte y corrija los errores producidos en la transmisión, puesto que incorpora un mayor nivel de redundancia que permite reconstruir los datos originales.

En este apartado se explica el funcionamiento de ambos mecanismos, y se introducen diversas técnicas que pueden ser utilizadas en cada uno de ellos.

Mecanismos de detección de errores ARQ

La detección de los errores se puede hacer principalmente mediante dos técnicas:

- **Códigos de paridad:** Estos códigos añaden un bit a cada palabra de m bits, de forma que se genera un código de $r=m+1$ bits. El bit añadido se denomina **bit de paridad**, y se genera de modo que el número total de **1**'s sea impar (paridad impar, más común) o par (paridad par). En la recepción se comprueba que el número total de **1**'s del código de r bits sea correcto, pudiendo detectar cualquier error que afecte a un número impar de bits. Si el número de **1**'s es correcto se extrae la palabra de datos de m bits.

Una variante del uso de un bit de paridad es la comprobación de **paridad en dos dimensiones**. En este método se organizan los datos en matrices de j por k y se calcula el bit de paridad para cada una de las j filas y k columnas, enviándose la matriz de $j+1$ por $k+1$ como código al destino.

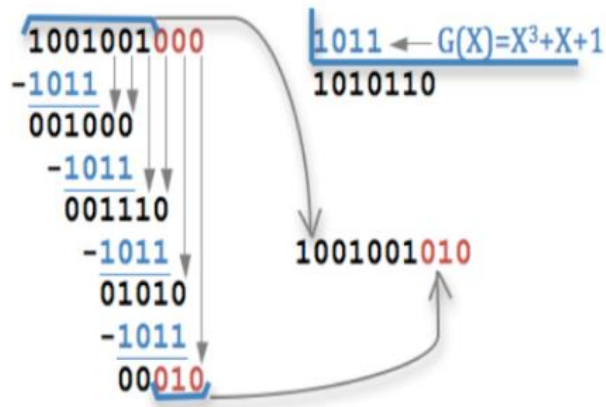
- **Comprobación de Redundancia Cíclica (CRC):** Los códigos CRC son un tipo de códigos cíclicos en los que cada palabra de m bits se representa por un código de r bits, y sólo los códigos de r bits que están asociados a una palabra son válidos. Teniendo en cuenta que $r > m$, existen múltiples palabras código que no son válidas. Estos códigos se denominan cíclicos porque a partir de cada código válido, cualquier rotación cíclica a la izquierda genera otro código válido.

El cálculo del código de r bits para una palabra de m bits se realiza de la siguiente forma: se concatenan $r-m$ ceros a derecha de la palabra de m bits, y el resultado es dividido entre un divisor determinado. La división realizada es una división en módulo 2, en la que no hay resto. El resto de dicha división se concatena con la palabra original para formar el código a transmitir. (Básicamente se realiza una operación XOR)

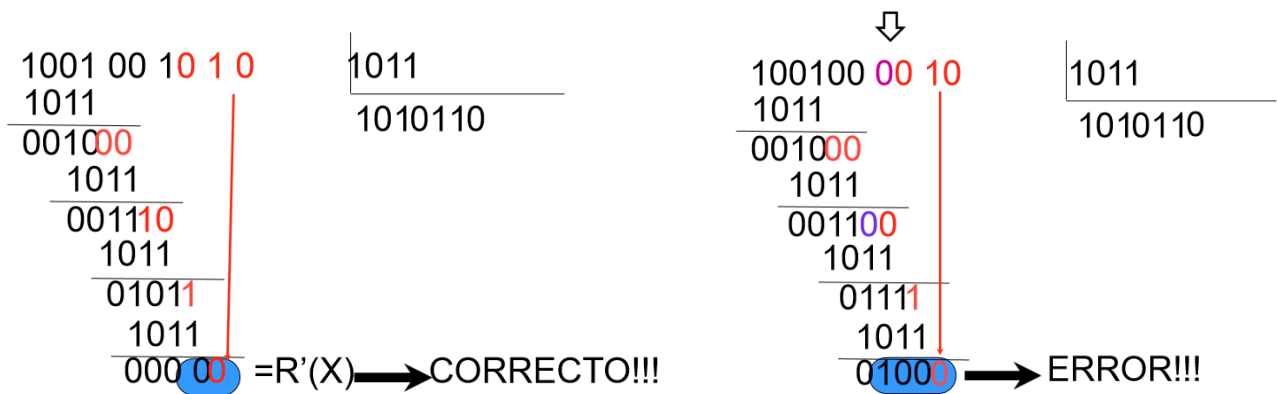
El receptor realiza la misma operación, que consiste en dividir el código recibido por el mismo divisor (que comparte con el emisor). Si el resultado es 0, el código se ha recibido correctamente y se extraen los primeros m bits del código como palabra de datos; mientras que un resultado distinto de 0 indica que ha habido errores en la transmisión y se desecha el código.

El divisor, que es compartido entre el emisor y el receptor, se forma a partir de polinomios generadores. Por ejemplo, el polinomio $G(x) = x^3+x+1$ genera el dividendo **1011**. La elección del polinomio generador influye en la capacidad del código CRC para detectar errores.

1. Se añade al mensaje, en este caso $M(x) = x^6+x^3+1$, una tira de 0's (tantos como grado tenga el polinomio $G(x)$)
2. Se realiza una división de polinomios normal, exceptuando que al restar, en lugar de ser una resta se hace una XOR
3. Al acabar, cogemos el resto y lo añadiremos al final del mensaje $M(x)$. Este será el mensaje a enviar.



4. En recepción, se realizará la misma operación, pero esta vez con el $M(x)$ recibido, en este caso: 1001001010
5. Si el resto de la división queda 0 \rightarrow resultado correcto, si no, se detecta que ha habido un error y se solicita un reenvío.



Errores detectados:

- Errores de un único bit
- Errores dobles, siempre que $G(x)$ tenga al menos tres 1's
- Número impar de errores, siempre que $G(x)$ tenga el factor $(x+1)$
- Ráfagas de errores de longitud menor que la longitud de $G(x)$
- La mayoría de las ráfagas de longitud mayor

No se puede detectar cualquier error, sino sólo aquellos para los que han sido diseñados. Además, no pueden corregir dichos errores. Para obtener los datos correctos cuando se ha detectado un error se utilizan mensajes de **confirmación** (confirmación de recepción correcta o incorrecta), que son enviados en sentido contrario a los datos y permiten al origen conocer qué fragmentos de los datos han llegado con errores, para así reenviarlos.

Mecanismos para la corrección automática de errores FEC

En determinadas circunstancias, la estrategia de detección de errores no resulta adecuada. Por ejemplo, en transmisiones inalámbricas donde la tasa de errores es muy alta se produce

un número excesivo de retransmisiones; además, en transmisiones con mucho retardo, como aquellas realizadas a través de satélite, la retransmisión resulta muy ineficiente. Por esta razón se utilizan métodos de detección de errores que, además, permiten identificar el bit (o los bits) modificados, para obtener el mensaje enviado sin necesidad de retransmisión.

Para la descripción de los mecanismos de corrección automática de errores se va a explicar primero el concepto de los **códigos de bloque**, que sirven tanto para detectar como para corregir errores de transmisión. Los códigos de bloque consisten en dividir la información a transmitir en palabras de m bits de longitud. Cada palabra tiene asociado un código de r bits que se transmitirá en su lugar, generalmente formado añadiendo $r-m$ bits a la palabra. Las diferentes técnicas existentes para la generación de estos códigos quedan fuera del alcance de la asignatura.

A continuación, se muestra un ejemplo de código de bloque que transmite los datos en palabras de 3 bits, utilizando para ello códigos de 6 bits.

Palabra	Código
000	000111
001	001100
010	010001
011	011010
100	100010
101	101001
110	110100
111	111111

De los 2^r códigos disponibles, tan sólo 2^m se corresponden con una palabra y son, por tanto, **códigos válidos**. Si se recibe un código válido, se extrae la palabra asociada a dicho código; en cambio, si se recibe un código inválido se deduce que se ha producido un error y, en determinados casos, se puede corregir.

Es necesario destacar que los códigos de bloque sólo detectan o corrigen los errores para los que han sido diseñados. Por ejemplo, pueden estar diseñados para detectar errores de 2 bits en una palabra, o para corregir un único bit erróneo. Esta medida se basa en la *Distancia de Hamming*.

La **Distancia de Hamming** $d(v1,v2)$ de dos secuencias binarias $v1$ y $v2$ de r bits consiste en un valor numérico que indica el número de bits en los que $v1$ y $v2$ no coinciden.

Para cada código válido se calcula la *distancia de Hamming* con todos los demás, y de entre ellas se obtiene la *mínima distancia de Hamming*, d_{min} . Esta distancia permite garantizar que, en una transmisión errónea:

- se pueden **detectar** hasta t errores, siendo $t = d_{min} - 1$
- se pueden **corregir** hasta t errores, siempre que $d_{min} \geq 2*t + 1$

En circunstancias especiales se pueden detectar y/o corregir más errores, pero no está garantizado.

Para la corrección de errores utilizando códigos lineales, al recibir un código erróneo se puede calcular el código válido más próximo (según la *distancia de Hamming*), para así devolver la palabra asociada a dicho código válido. De esta forma, a partir de un código erróneo, hasta el límite de errores para el que se diseñó el código, se puede determinar qué palabra se transmitió en origen, no siendo necesario retransmitir los datos.

En el ejemplo anterior, si se recibe el código `100100`, el único código que se encuentra a *distancia de Hamming* igual a 1 es `110100`, por lo que se extrae la palabra `110` asociada a él.

Códigos de doble paridad

1	1	0	0	1	1	1	1
1	0	1	1	1	0	1	1
0	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0	1	1
0	1	0	1	0	1	0	1

a. Design of row and column parities

1	1	0	0	1	1	1	1
1	0	1	1	1	0	1	1
0	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0	1	1
0	1	0	1	0	1	0	1

Corrige errores simples

1	1	0	0	1	1	1	1
1	0	1	1	1	0	1	1
0	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0	1	1
0	1	0	1	0	1	0	1

Detecta errores dobles

Corrige errores dobles si están en diferente fila y columna

1	1	0	0	1	1	1	1
1	0	1	1	1	0	1	1
0	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0	1	1
0	1	0	1	0	1	0	1

Detecta errores triples

Corrige errores triples si están en diferente fila y columna

1	1	0	0	1	1	1	1
1	0	1	1	1	0	1	1
0	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0	1	1
0	1	0	1	0	1	0	1

Ni detecta, ni corrige